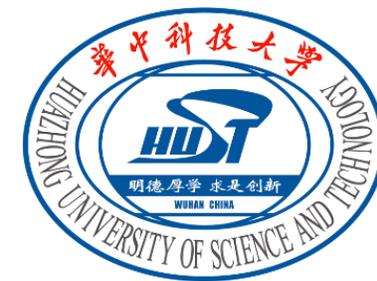


中国制冷展 “绿色数据中心高效制冷应用发展论坛”，上海



数据中心高效冷却技术 现状与展望

邵双全

2021-04-07

华中科技大学

学习工作经历

- 1994/9~2005/7 清华大学 热能工程系/建筑学院 学士/博士
- 2005/9~2009/3 LG DAC-Lab Senior Research Engineer/研发部长
- 2009/4~2019/6 中科院理化所 博士后/副研究员/项目研究员
- 2019/7~今 华中科技大学能动学院/中欧能源学院 教授/博导

学术兼职

- 2020 ~ 暖通空调产业技术创新联盟数据中心专业委员会, 理事
- 2020 ~ 全国家用电器标准化委员会智能家电分技术委员会, 委员
- 2020 ~ 中国机械工程学会包装与食品工程分会, 委员
- 2016 ~ 中国制冷学会学术工作委员会, 委员
- 2015 ~ 中国制冷学会数据中心冷却工作组技术委员会, 委员
- 2014 ~ 2016, 中国科学院院士咨询项目, 专家组成员兼报告执笔人

学术成果

- 承担国家自然科学基金、科技支撑计划、重点研发计划等国家级项目及企业合作项目30余项
- 获得国家科技进步二等奖、北京市科学技术二等奖、广东省科学技术三等奖等奖励10余项
- 在Renew Sust Energy Rev, Applied Energy, Energy, Solar Energy 等杂志发表论文150余篇
- 申报发明专利60余项, 参与出版专著10部, 获得软件著作权2项



shaoshq@hust.edu.cn
13051252727



报告内容

数据中心发展现状与趋势

数据中心冷却技术节能原理

数据中心冷却技术节能技术

数据中心发展现状与趋势

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（13省市已公布投资25.6万亿）
- 是我国数字经济发展的引擎和载体（2019年达到35.8万亿，2025年超过60万亿）



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



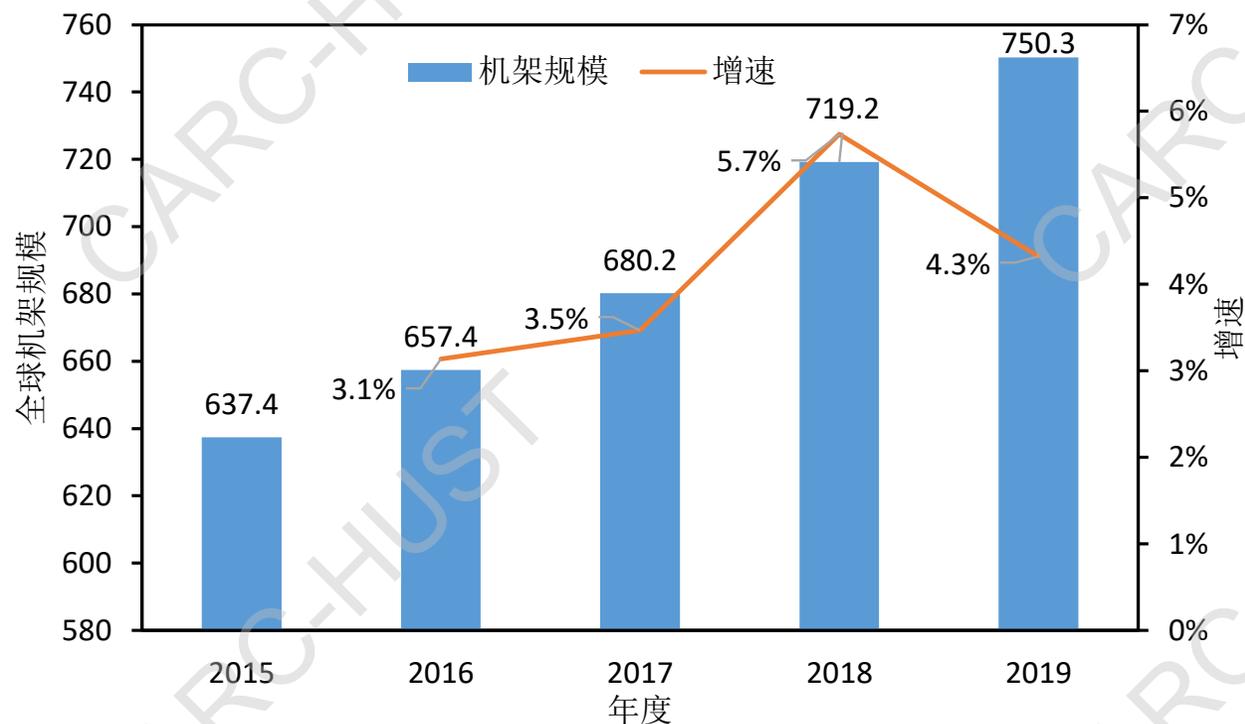
特高压



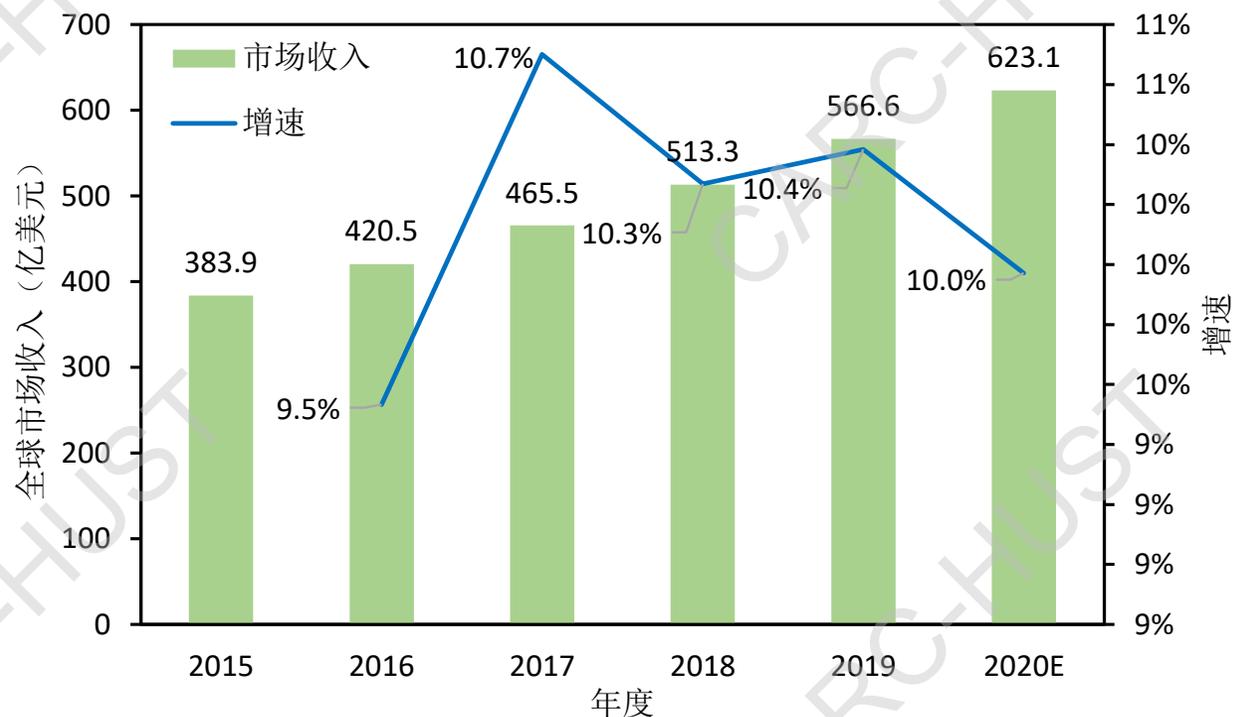
新能源汽车充电桩

数据中心发展现状与趋势

全球数据中心产业发展现状与趋势



全球数据中心发展状况

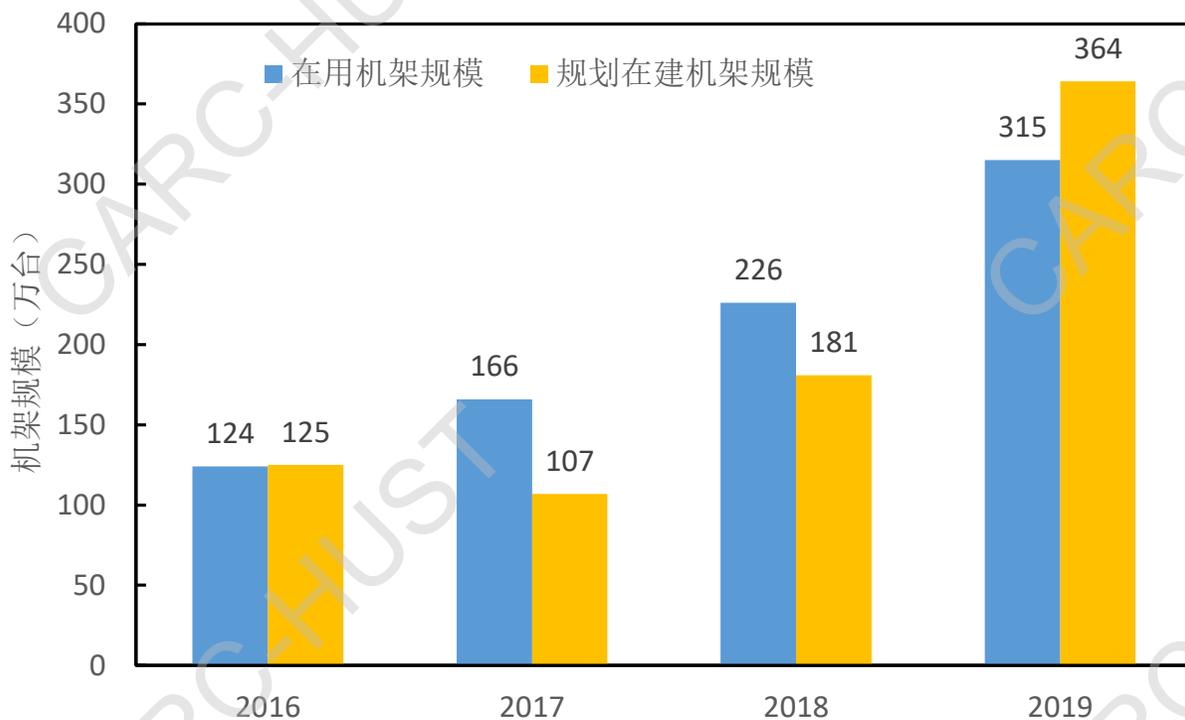


全球数据中心市场收入状况

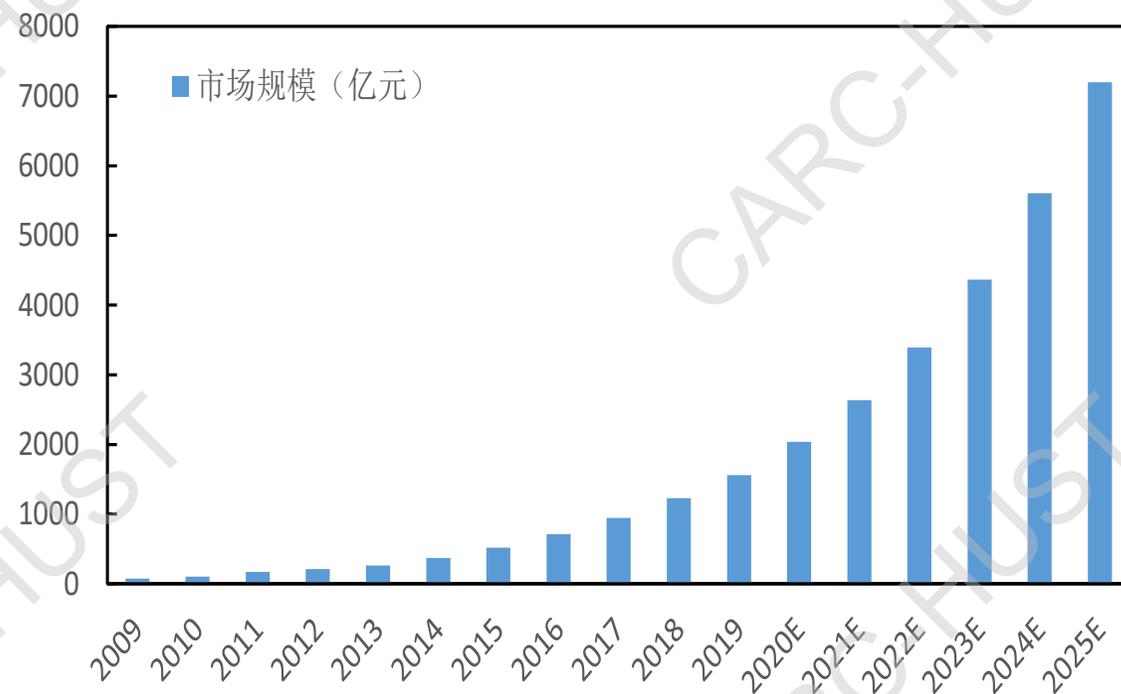
数据来源：中国信息通信研究院、开放数据中心委员会，《数据中心白皮书2020》

数据中心发展现状与趋势

我国数据中心产业发展现状与趋势



我国在用和规划在建数据中心规模



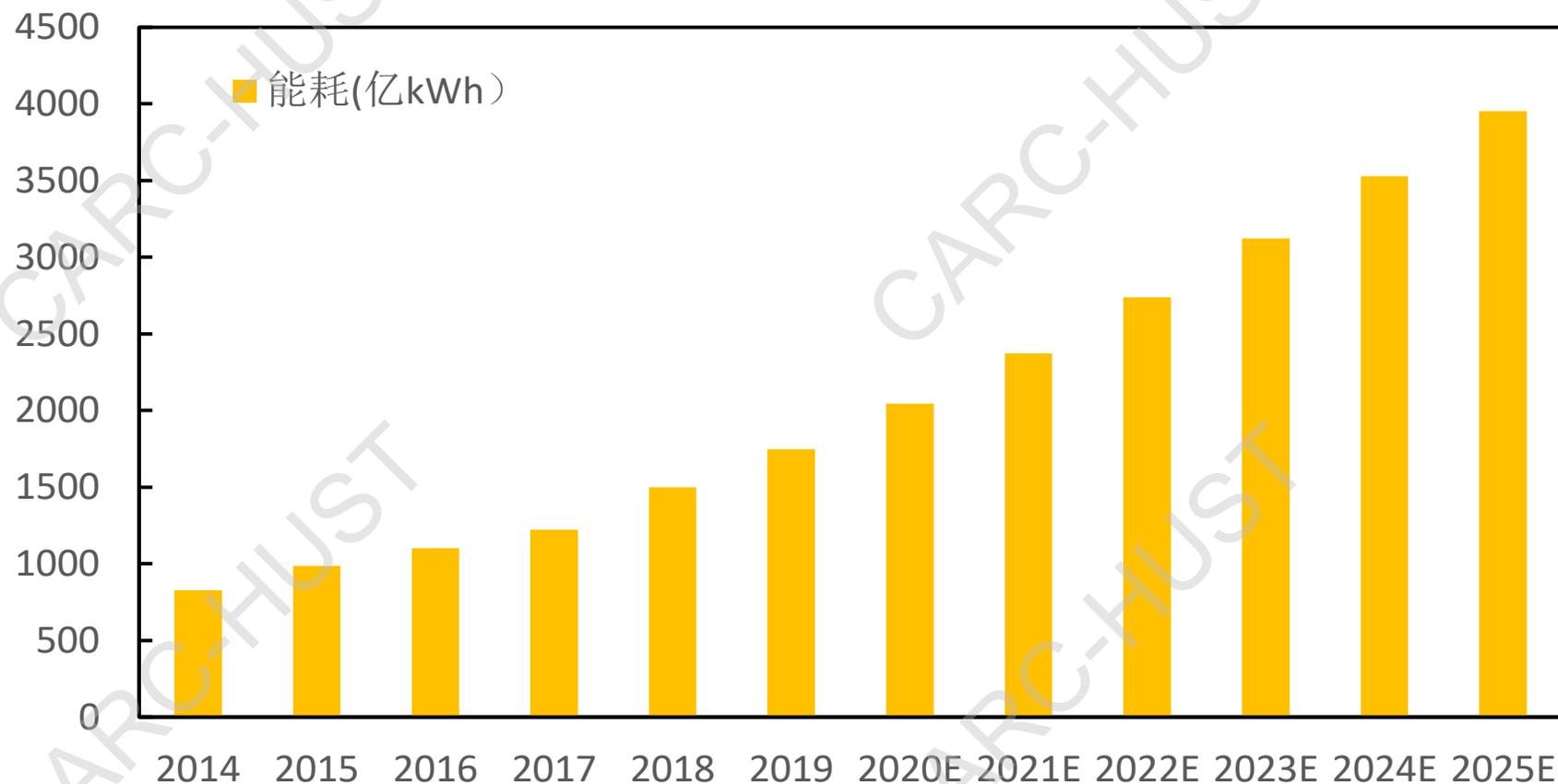
我国数据中心市场规模及预测 (图中E表示预测值)

数据来源: 工信部信息通信发展司《全国数据中心应用发展指引》(2017, 2018, 2019, 2020)

中国制冷学会数据中心冷却技术工作组《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告2020》

数据中心发展现状与趋势

2030碳达峰、2060碳中和：数据中心绿色发展



我全国数据中心耗电量及预测（图中E表示预测值）

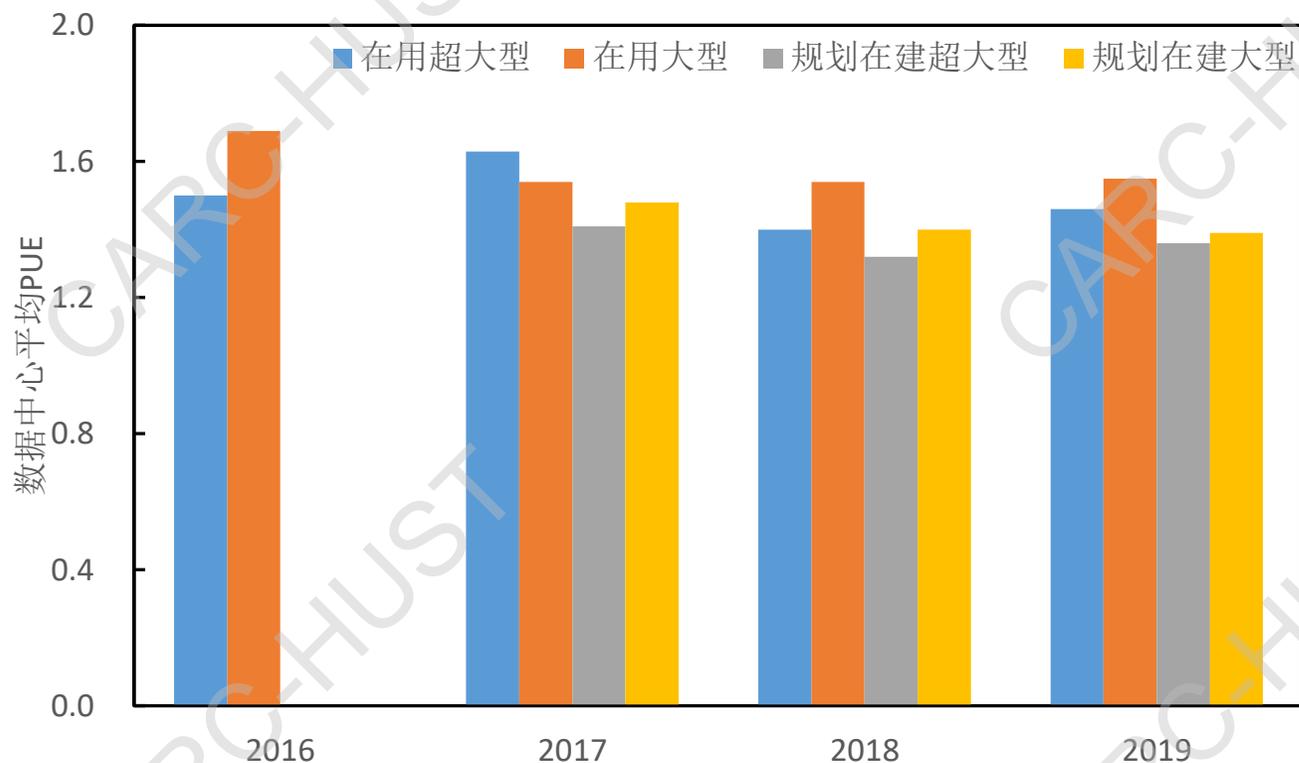
绿色能源

节能减排

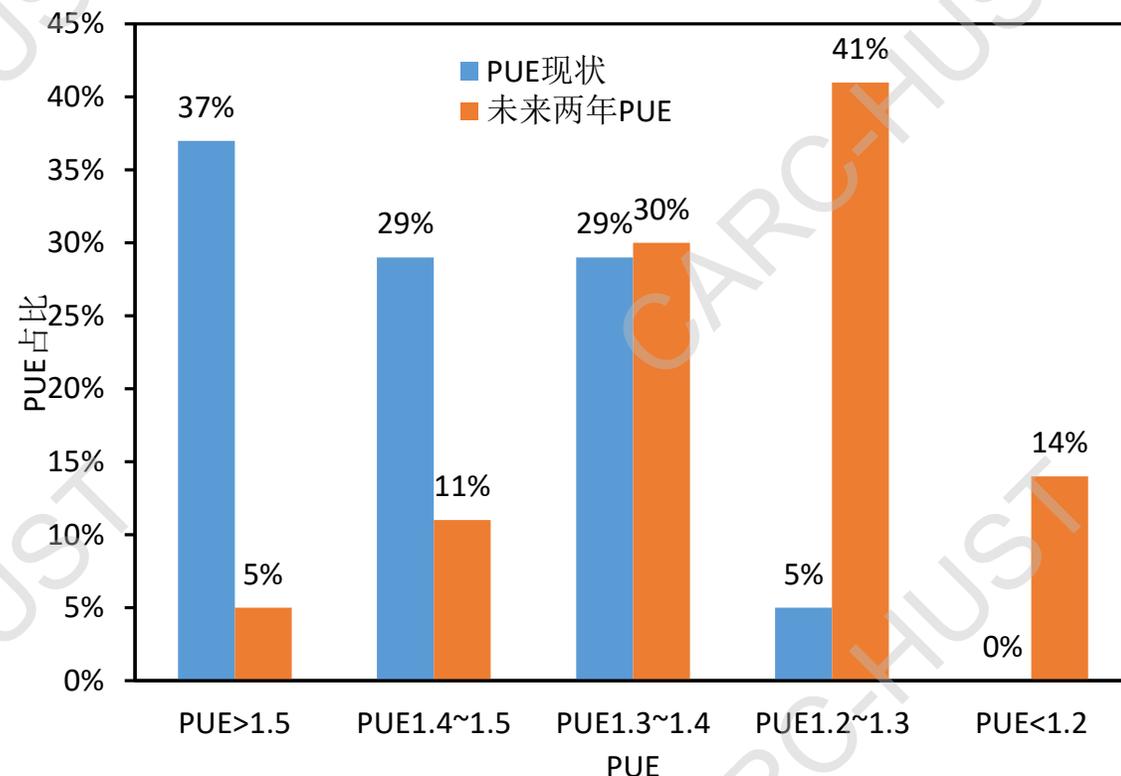
数据来源：中国制冷学会数据中心冷却技术工作组《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告2020》

数据中心发展现状与趋势

我国数据中心能效状况



我国数据中心能效状况



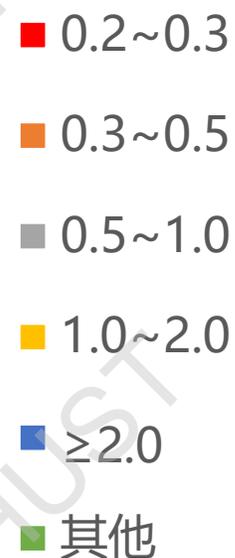
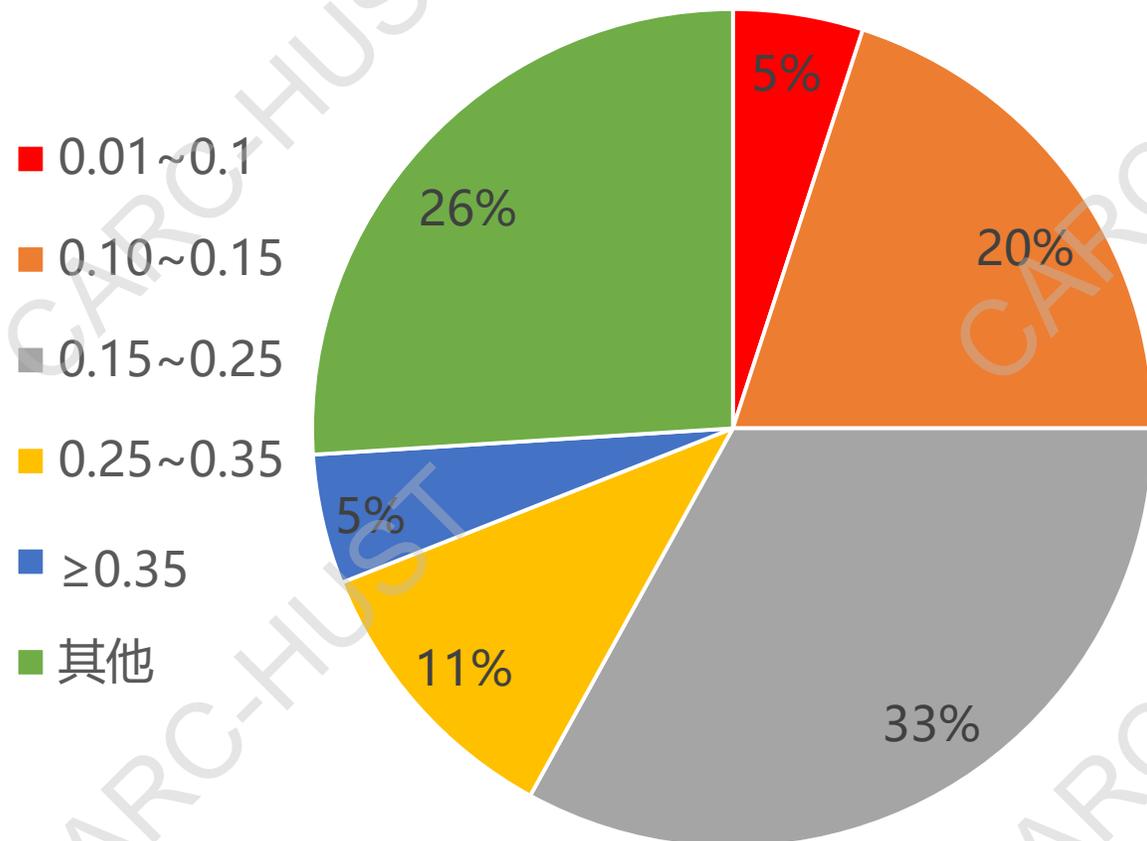
我全国数据中心能效状况分布及趋势

数据来源：工信部信息通信发展司《全国数据中心应用发展指引》（2017, 2018, 2019, 2020）

中数智慧信息技术研究院《2020年中国数据中心市场报告》

数据中心发展现状与趋势

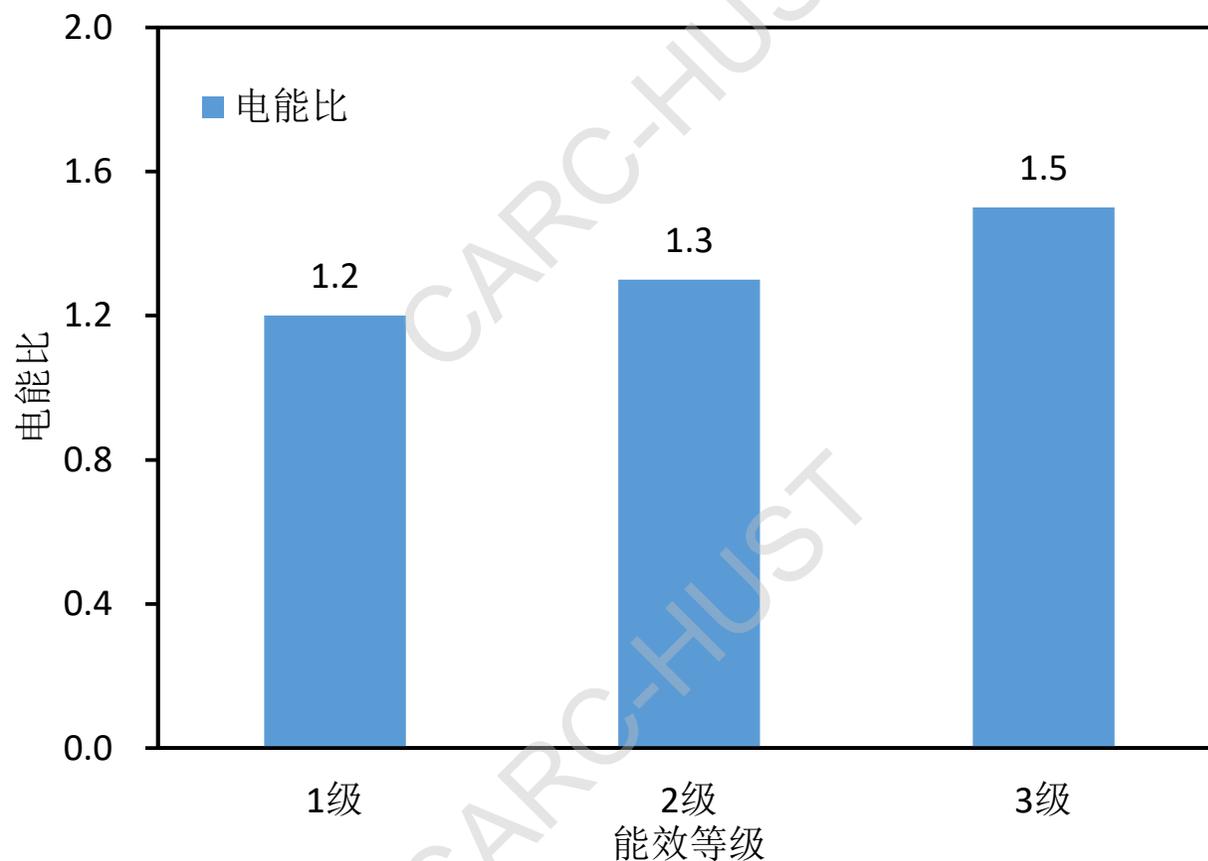
我国数据中心冷却能耗比与耗水率



数据来源：中数智慧信息技术研究院《2020年中国数据中心市场报告》

数据中心发展现状与趋势

数据中心产业能效要求

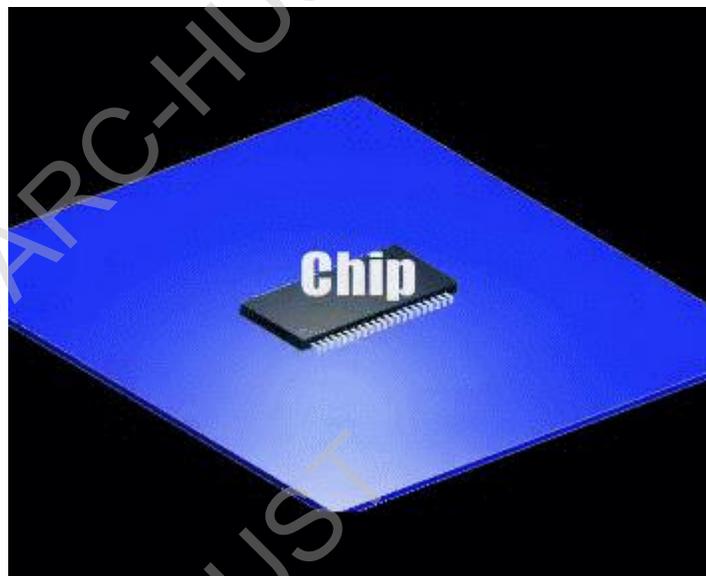


我全国数据中心能效要求

数据来源：GBxxxxx-xxxx 《数据中心能效限定值及能效等级》（报批稿）

数据中心冷却技术节能原理

不忘初心：保障IT设备的安全高效运行



80°C左右



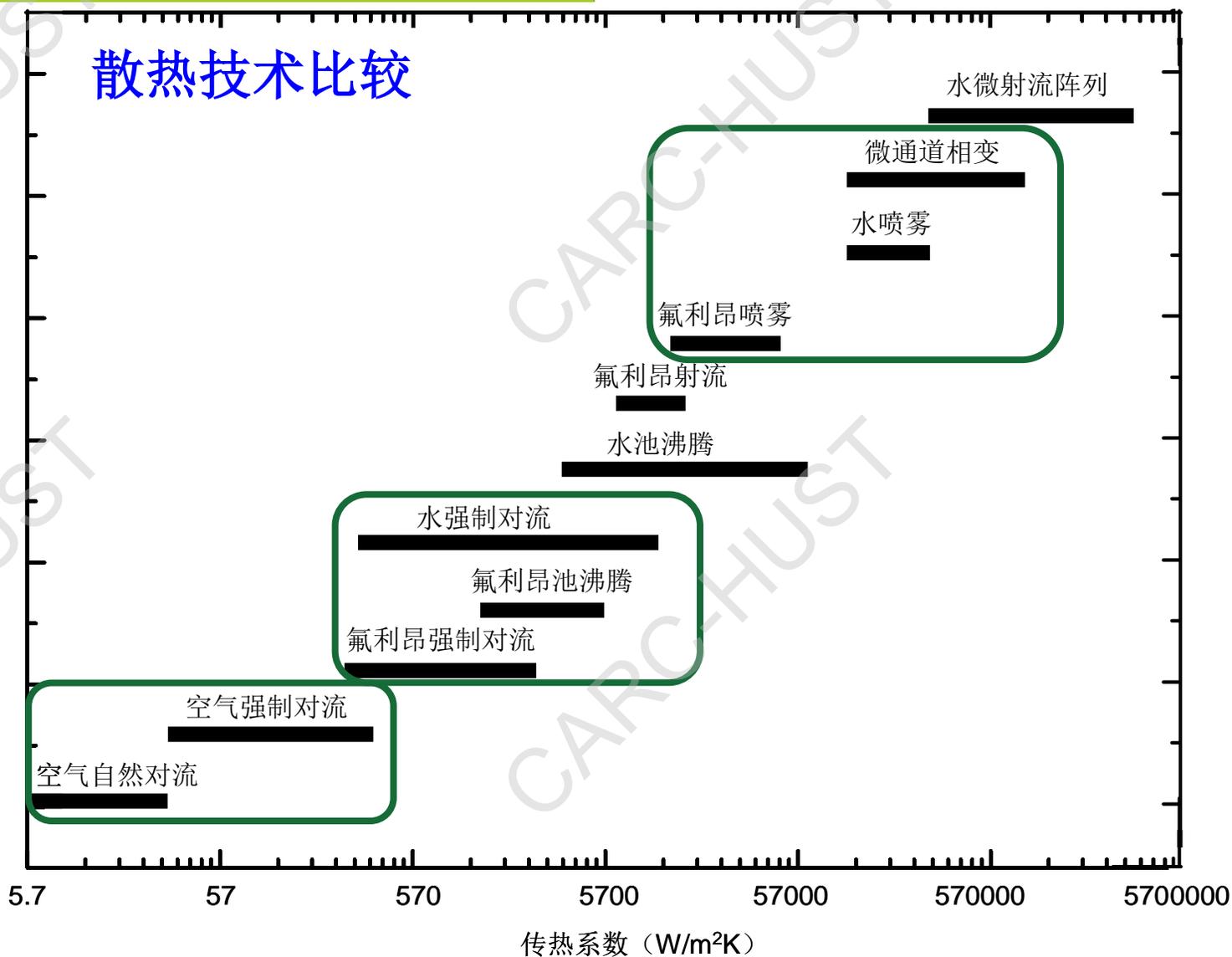
-40~40°C左右

- IT设备散热密度高，CPU峰值逼近 $1 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ ，相当于太阳表面热流密度。
- “热障”

数据中心冷却技术节能原理

数据中心冷却系统传热方式比较

强制对流液冷/相变液冷的传热系数比空气强制对流高**100**倍以上



$$Q = KF\Delta T$$

- 传热系数
- 传热温差
- 传热面积
- 介质流量

$$Q = \dot{m}C_p(T_i - T_o)$$

$$Q = \dot{m}\Delta h$$

数据中心冷却技术节能原理

数据中心冷却系统传热介质比较

$$Q = \dot{m}C_p(T_i - T_o) \quad Q = m\Delta h$$

→空气比热: 1.01kJ/kg·°C

→水比热: 4.2kJ/kg·°C

→制冷剂 (R22@15°C) 相变潜热: 192kJ/kg

$$T_i - T_o = 5 \sim 10^\circ\text{C}$$

$$T_i - T_o = 0^\circ\text{C}$$

➤传热温差越大, 传热损失越大, 流量越小, 输送能耗越小

➤制冷剂粘度小于水, 并可利用气液相密度差, 减小输送能耗 → 热管

→空气密度: 1.2kg/m³

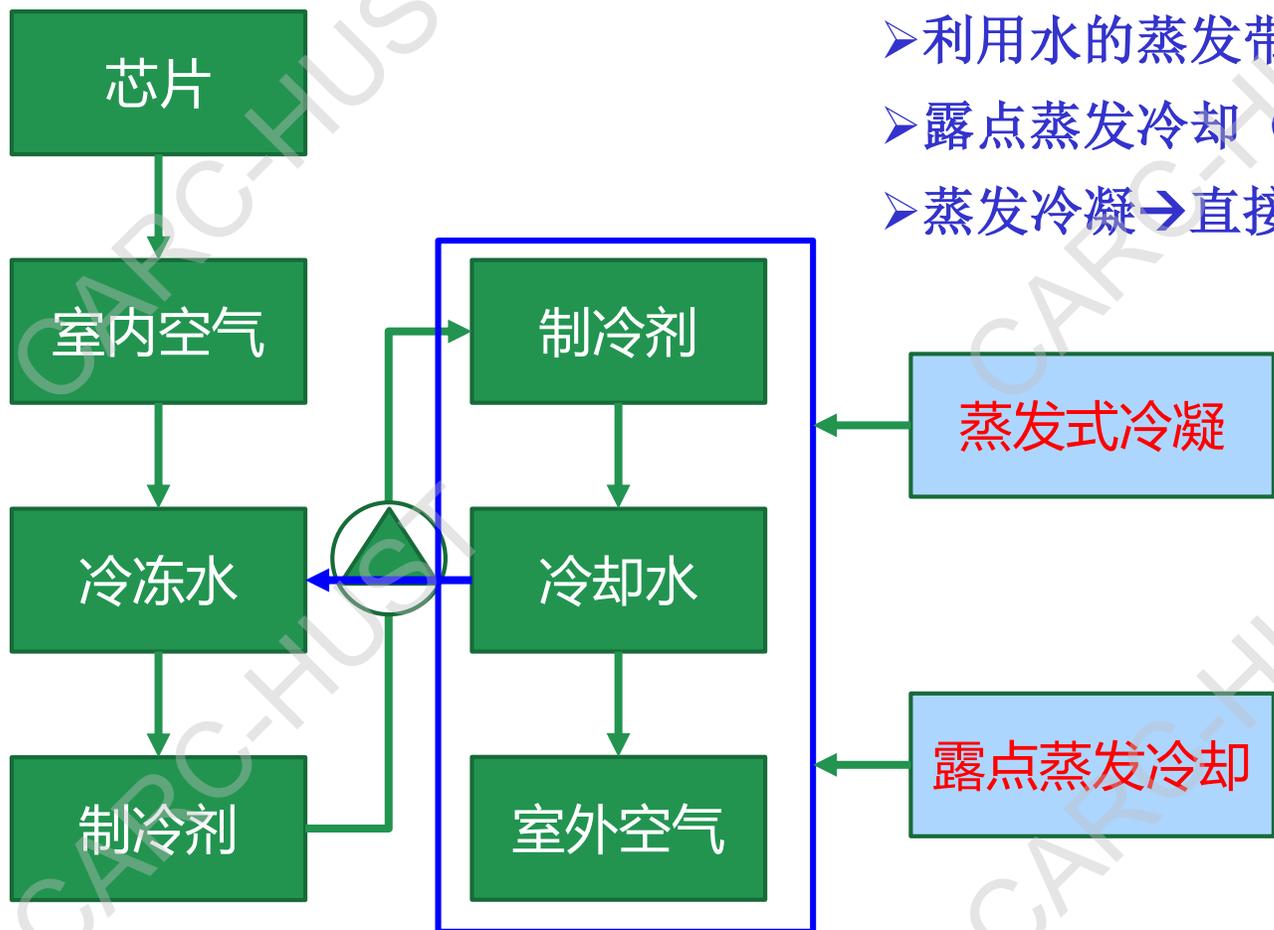
→水密度: 1000kg/m³

→制冷剂 (R22@15°C) 密度: 1229kg/m³ (液相) 1000kg/m³ (气相)

➤密度越大, 需要管路直径越小, 节省空间

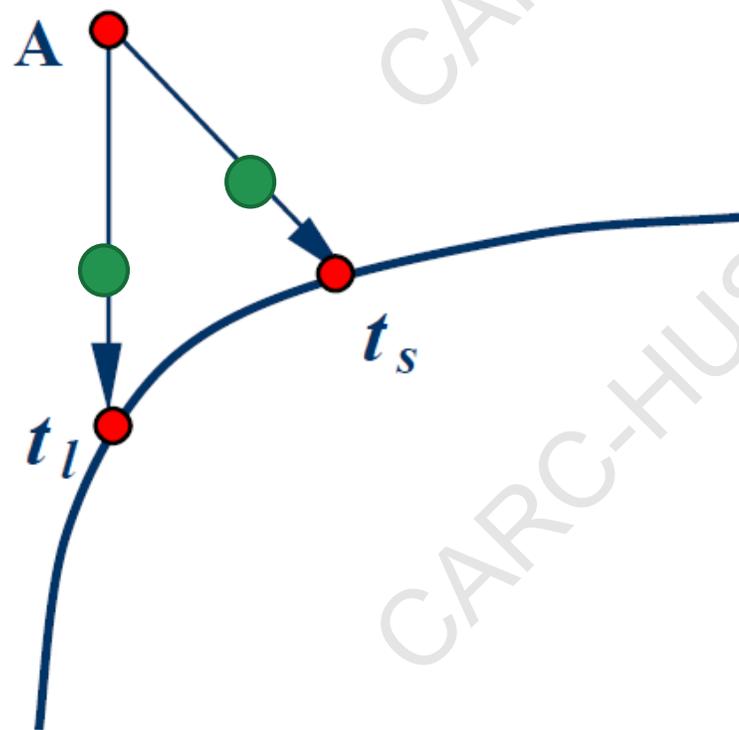
数据中心冷却技术节能原理

自然冷源与机械制冷：降低冷源温度



典型数据中心传热过程

- ▶ 利用水的蒸发带走部分热量
- ▶ 露点蒸发冷却（空气露点温度）→ 传统蒸发冷却（空气湿球温度）
- ▶ 蒸发冷凝 → 直接冷却制冷剂（减少传热环节）



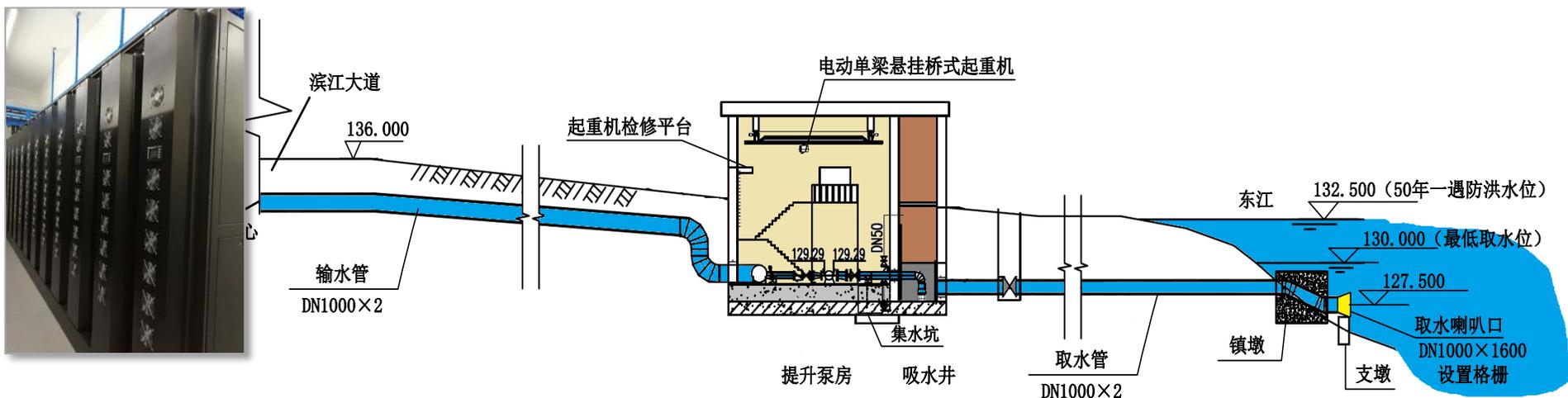
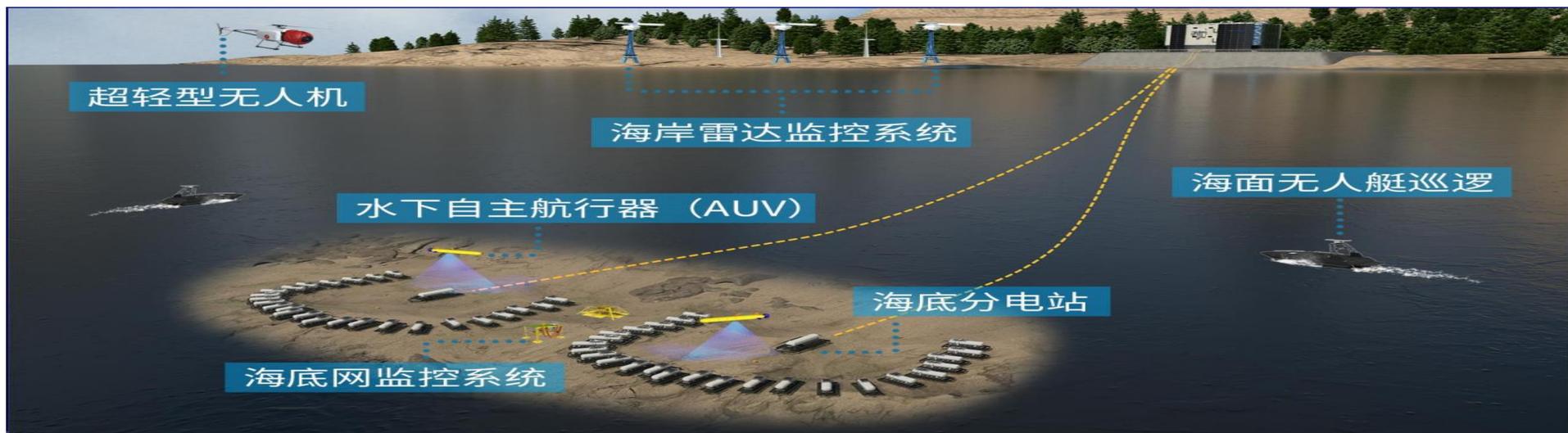
数据中心冷却技术节能原理

自然冷源与机械制冷：降低冷源温度



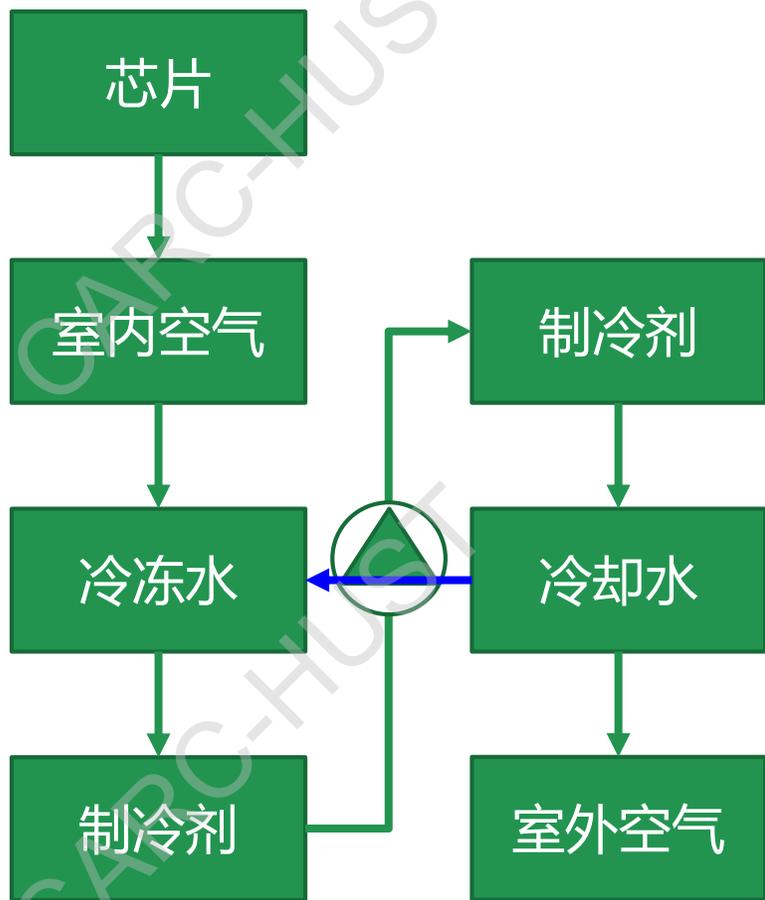
海水数据中心

高坝水库尾水

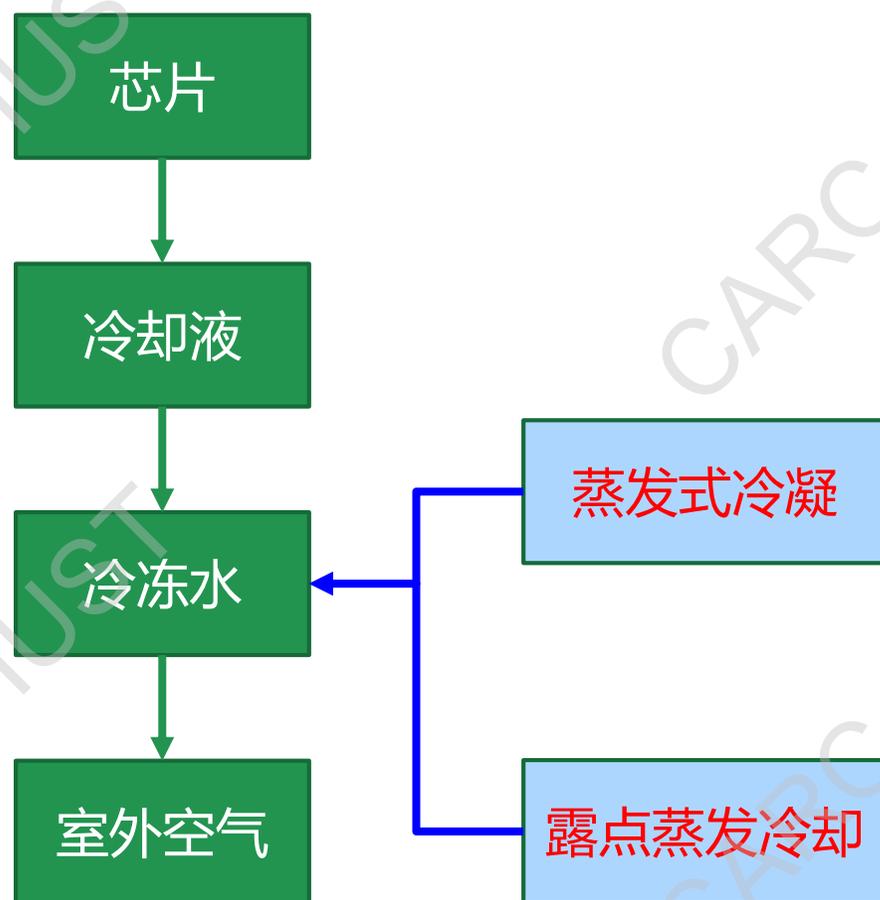
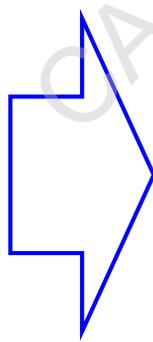


数据中心冷却技术节能原理

自然冷源与机械制冷：提升热源温度



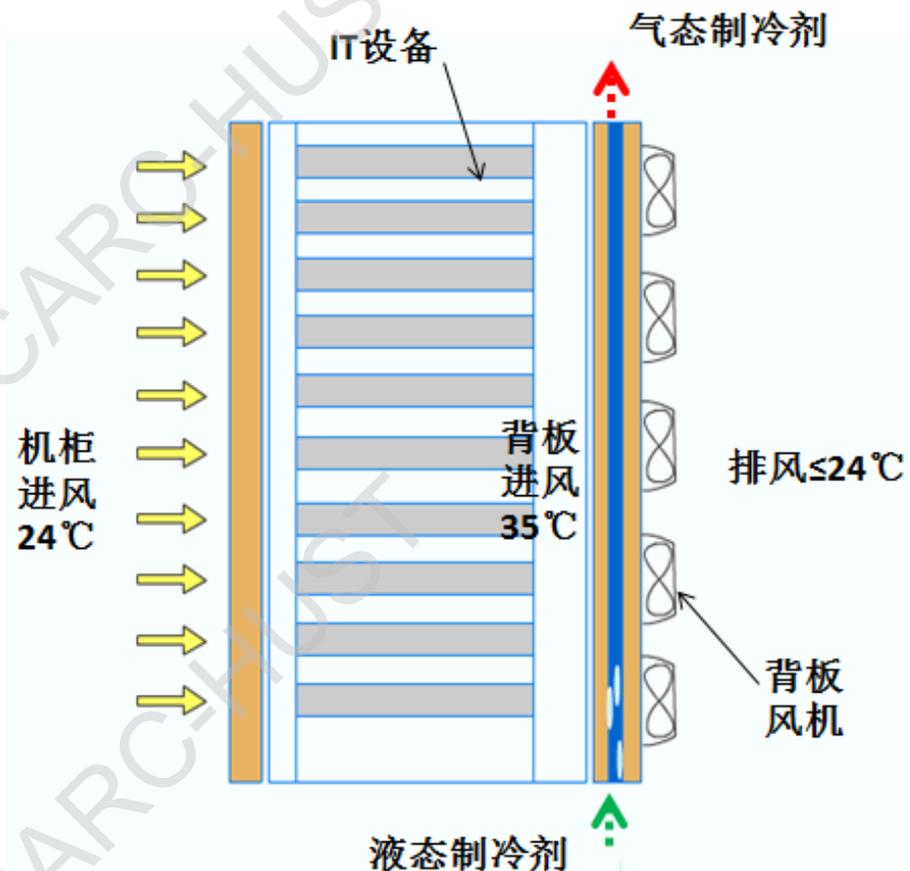
典型数据中心传热过程



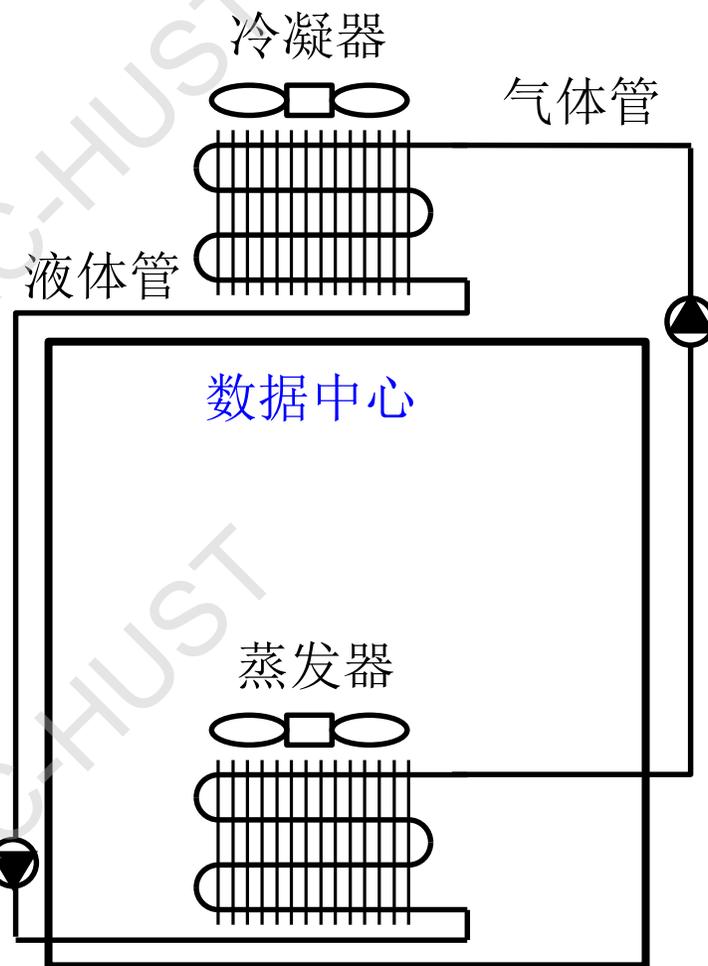
液冷数据中心传热过程

数据中心冷却技术节能原理

降低输配能耗



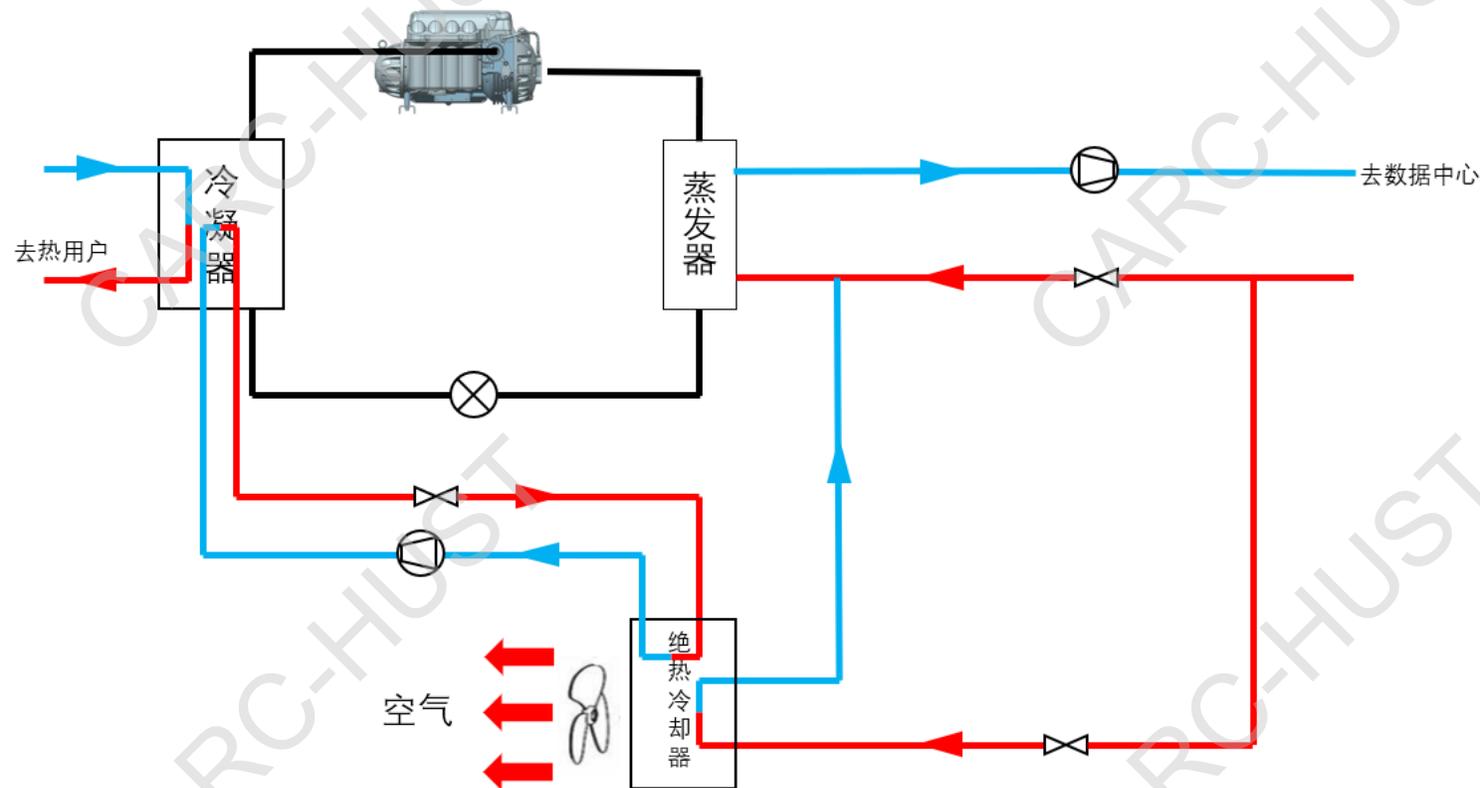
机柜级冷却



热管技术

数据中心冷却技术节能原理

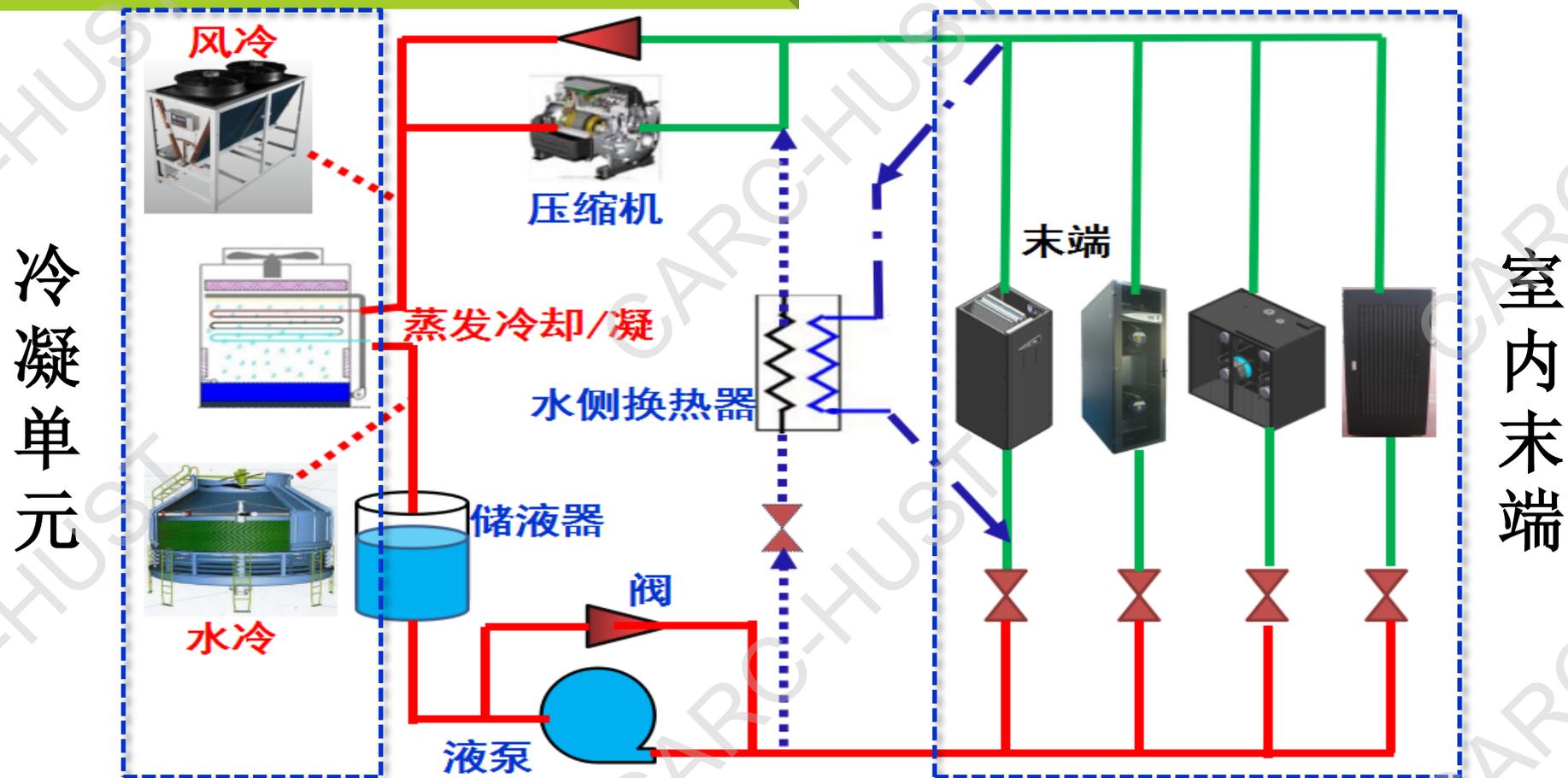
数据中心热回收



- 可以实现四种运行模式，**热回收模式**，**制冷模式**，**部分自然冷却**，**完全自然冷却**；
- 热回收模式运行时，不使用自然冷却。绝热冷却器供水回路水泵停止运行，供热侧循环水泵运行。机组运行原理与冷水机组相同。利用高压比压缩机，**最高出水温度可以达到65°C**。
- 不进行热回收时，机组按照冷水机组加绝热冷却器，搭载自然冷却使用。

数据中心冷却系统节能技术

数据中心冷却方案



- 集成运用气泵（磁悬浮压缩机）、液泵驱动热管技术
- 采用制冷剂/冷冻水末端，模块化、列间、风墙、背板等形式
- 冷凝单元包括风冷冷凝器、水冷冷凝器，或者间接蒸发冷却（冷凝）

浸没式液冷/喷淋式液冷

优势

- 传热效率高，流量小
输送能耗低
- 冷却温度提高
易于自然冷能利用

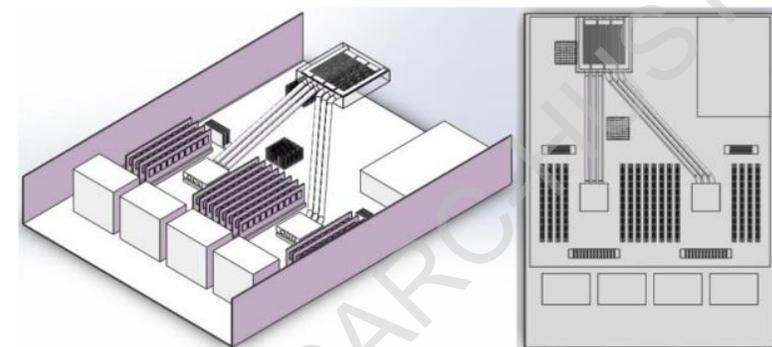
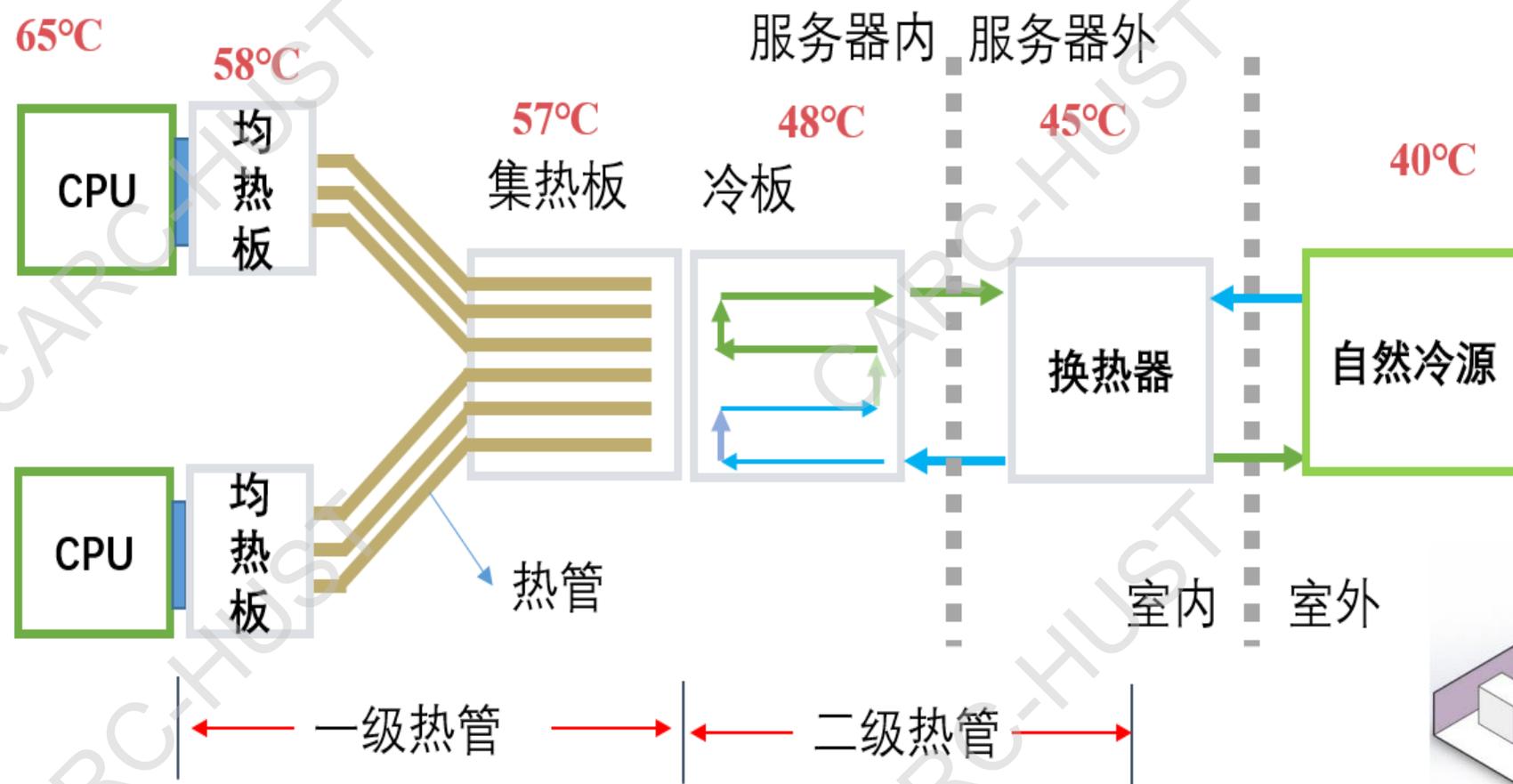
挑战

- 冷却液选型
- 运行围护
- 流场与散热优化

冷却介质	导热率 W/(m·K)	比热容 kJ/(kg·K)	单位体积热 容kJ/(m ³ ·K)
空气	0.024	1	1.17
水	0.58	4.18	4180
冷却液	0.15	1.7	1632



冷却介质	空气	冷却液
CPU功率(W)	120	120
进口温度(°C)	22	35
出口温升(K)	17	5
介质流量(m ³ /h)	21.76	0.053
CPU散热片温度(°C)	46	47
CPU温度(°C)	77	75

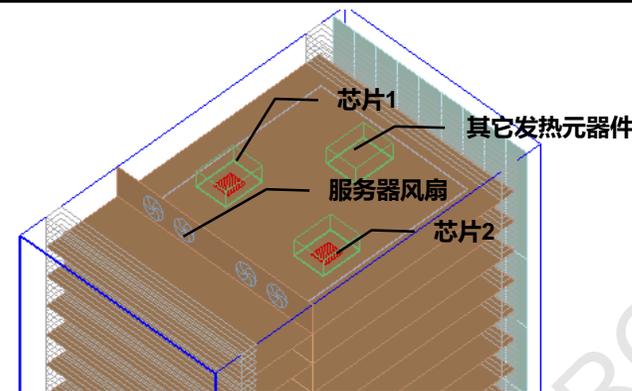
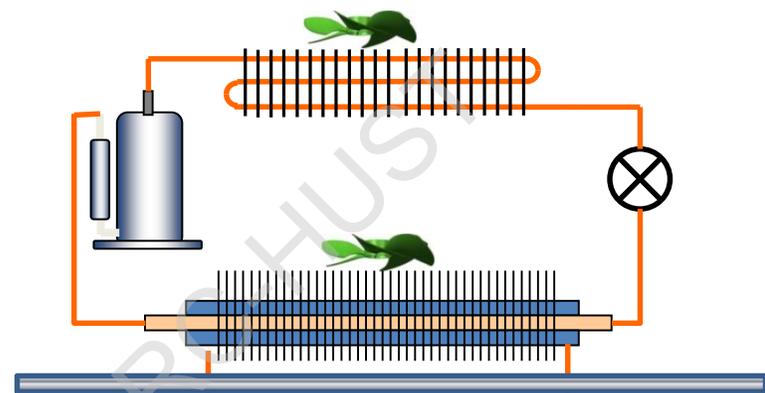


基于液冷的双级回路热管自然冷却传热流程

液冷服务器

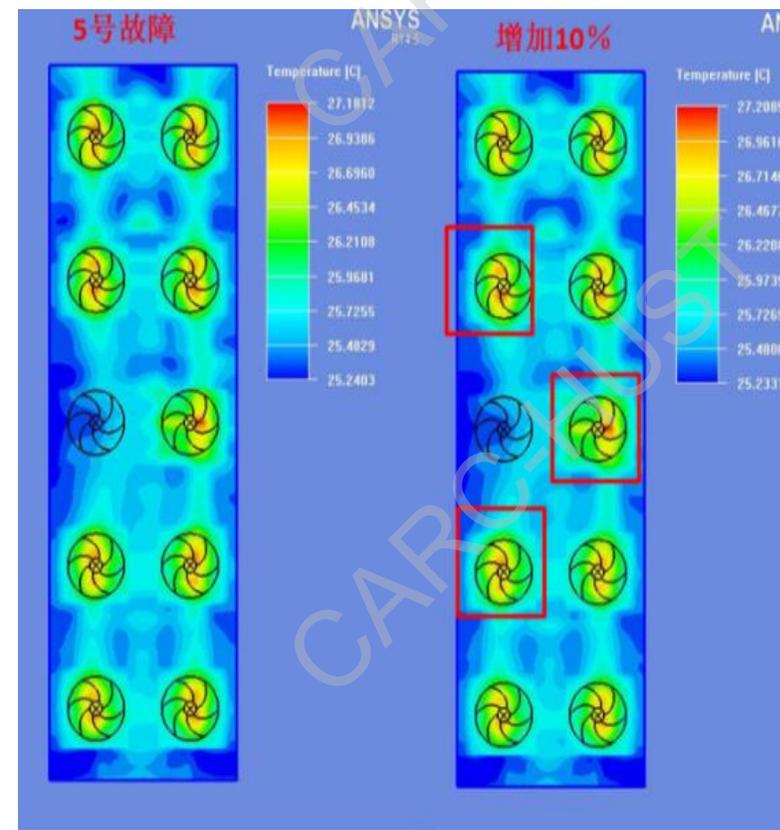
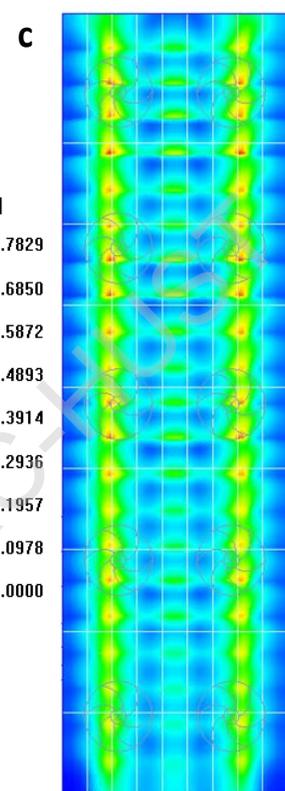
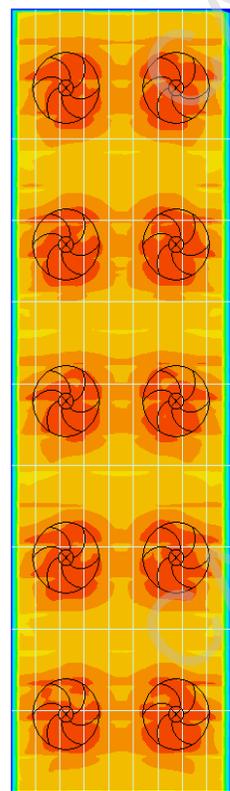
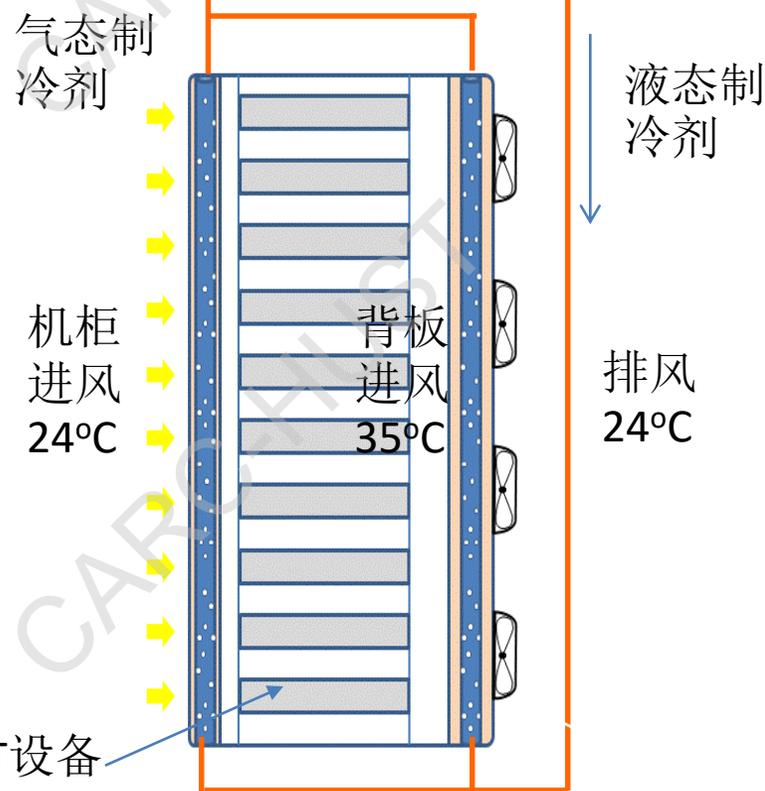
数据中心冷却系统节能技术

热管背板

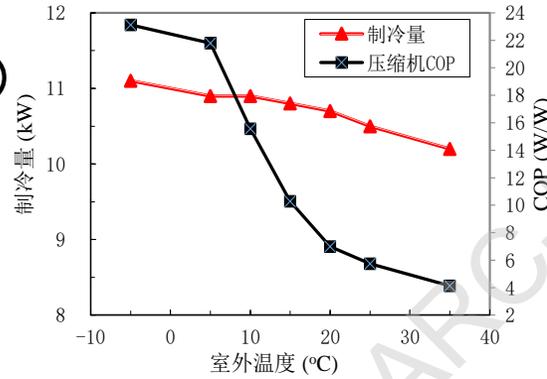
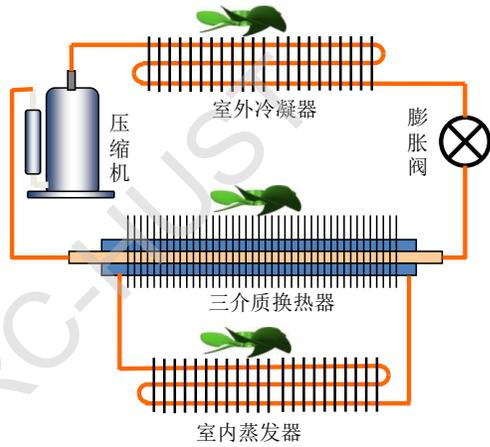


服务器设置

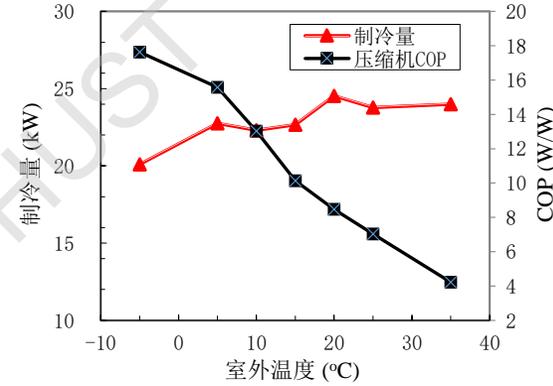
- 2U服务器
- 2个CPU
- 1个主板
- 1个发热集成
- 4个微型风扇



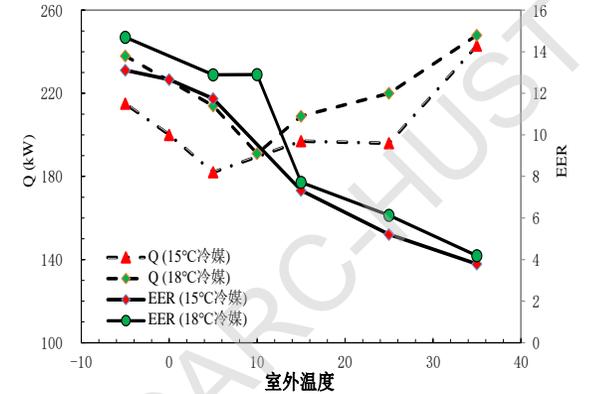
重力驱动



转子压缩机

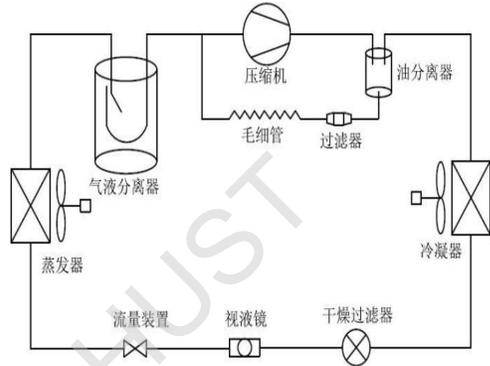


涡旋压缩机

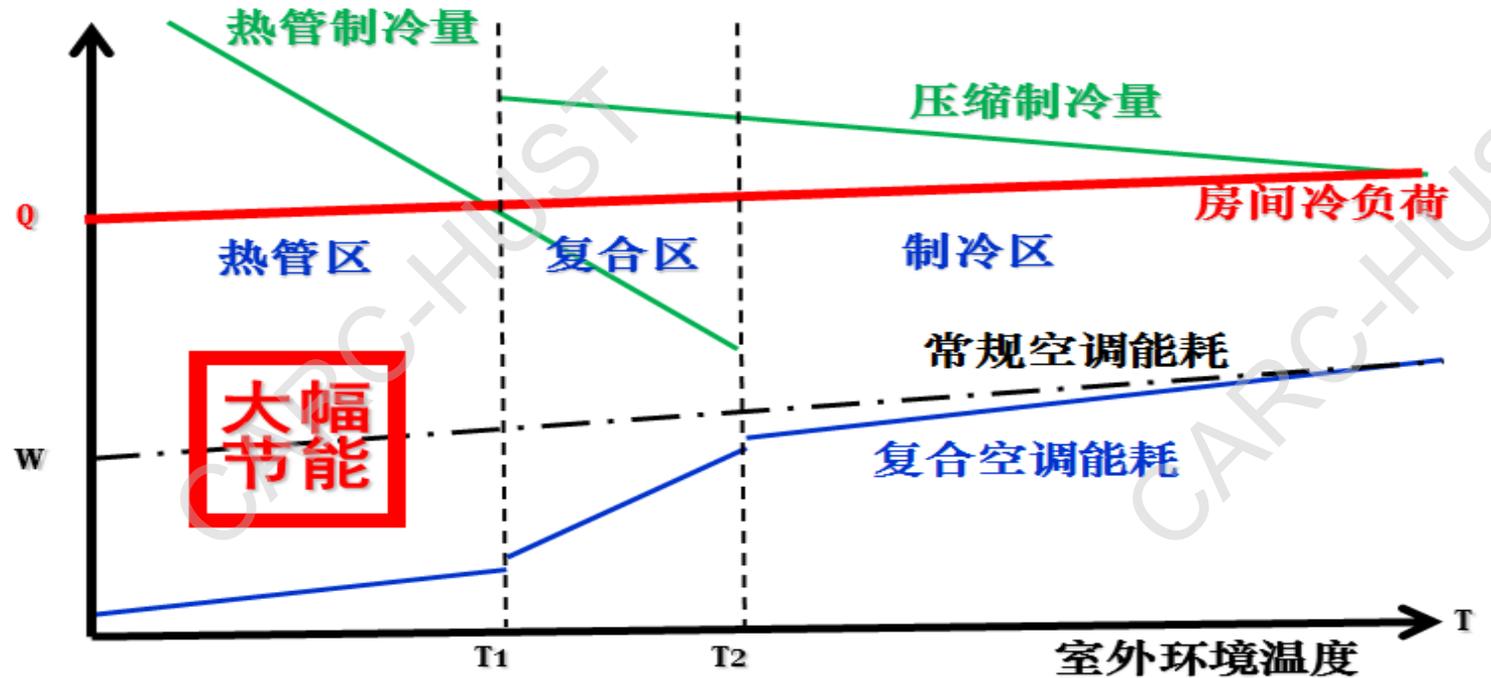
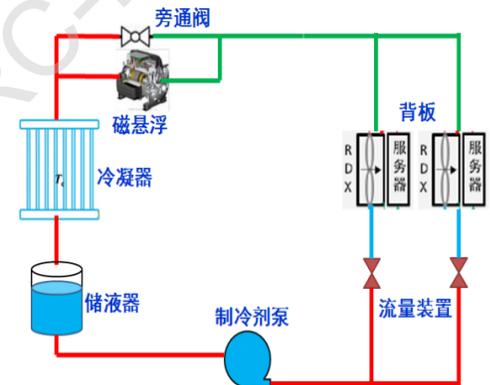


磁悬浮离心压缩机

气泵驱动



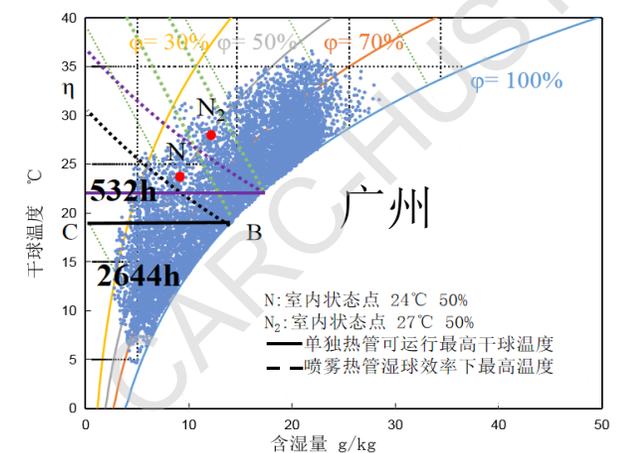
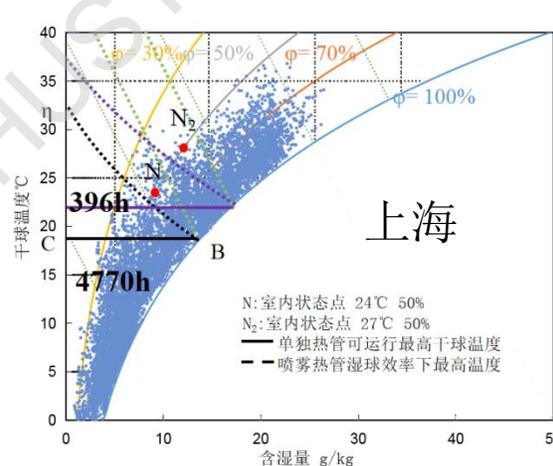
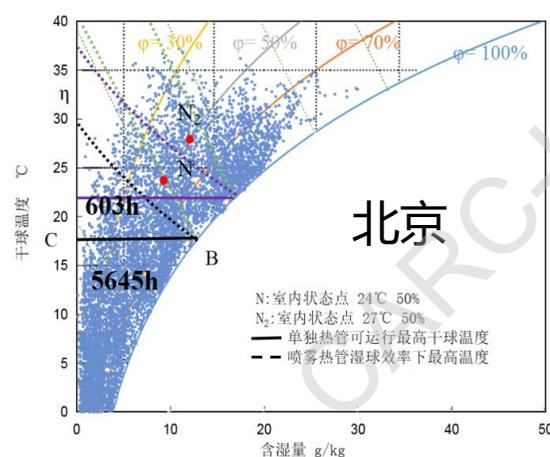
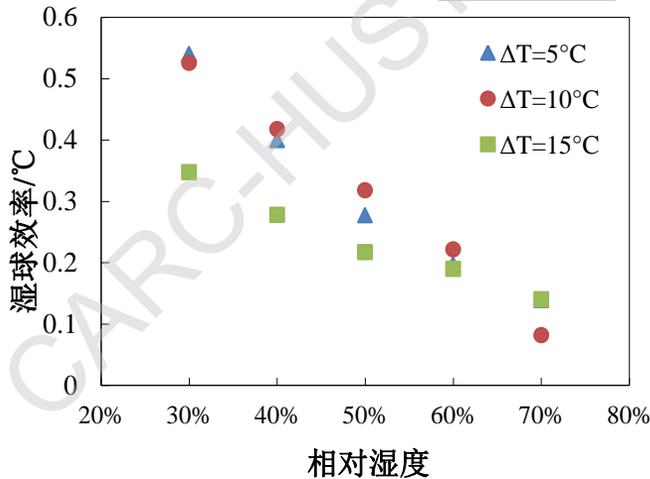
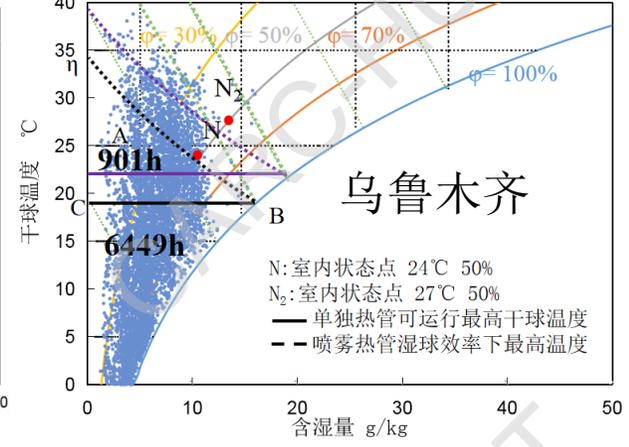
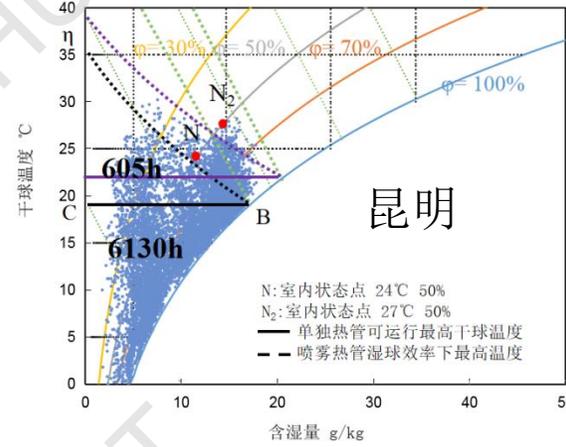
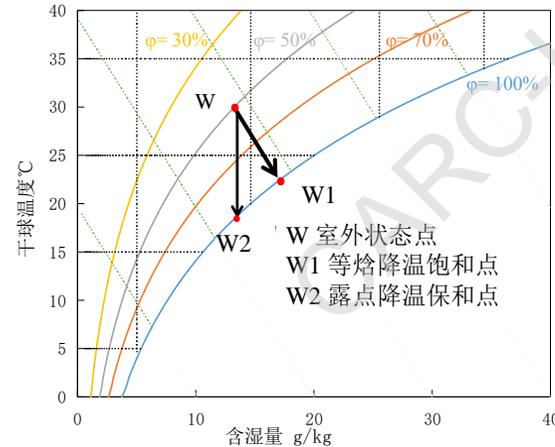
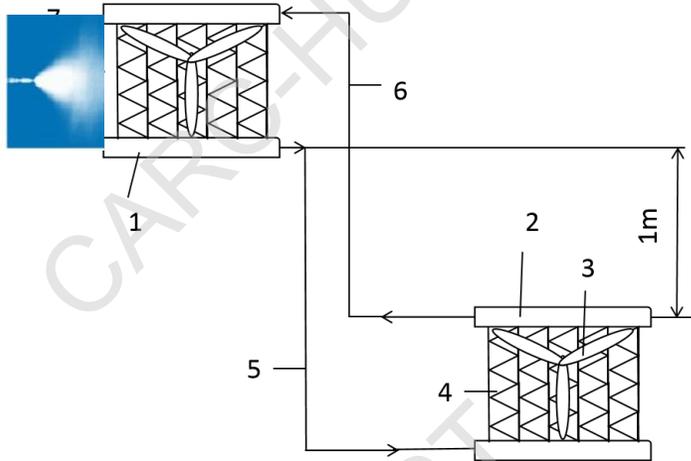
液泵驱动



数据中心冷却系统节能技术

喷雾冷却热管

- ✓ 技术突破：将高压微雾蒸发冷却与回路热管冷却相结合，降低冷凝环境温度
- ✓ 实施效果：回路热管自然冷却时间提高了10%~20%

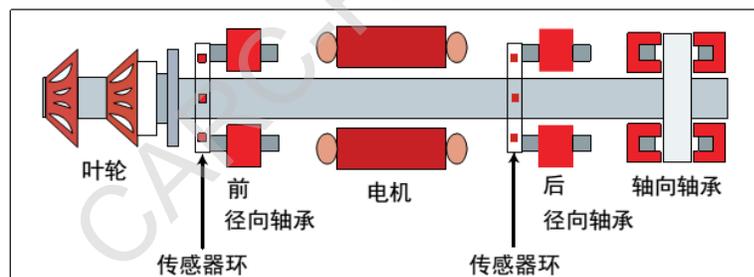


数据中心 负荷特征

- 冷负荷大、湿负荷小 → 高温冷水机组 (7°C→16°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

磁悬浮离心机组

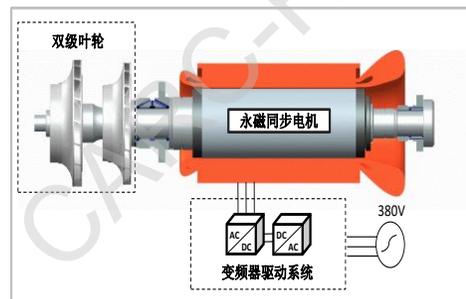
- 磁悬浮
→ 提高压缩机性能
- 无油润滑
→ 提高系统运行性能



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

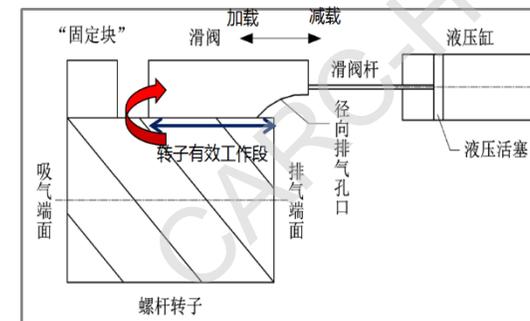


双级离心压缩机

高温螺杆机组

- 变转速：调节制冷量
- 调滑阀：变压比运行

解耦控制



螺杆压缩机

数据中心冷却系统节能技术

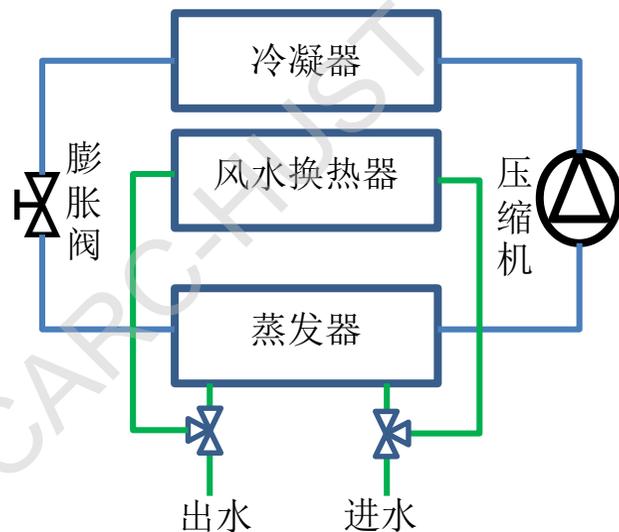
冷水主机+自然冷却

风冷冷水机组
空气干球温度

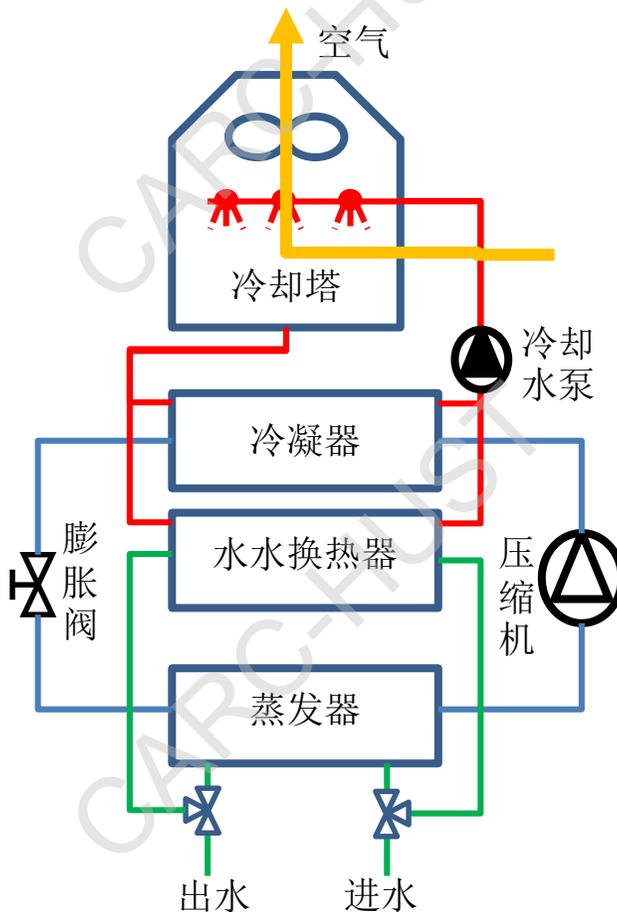
干球温度全年时长

湿球温度全年时长

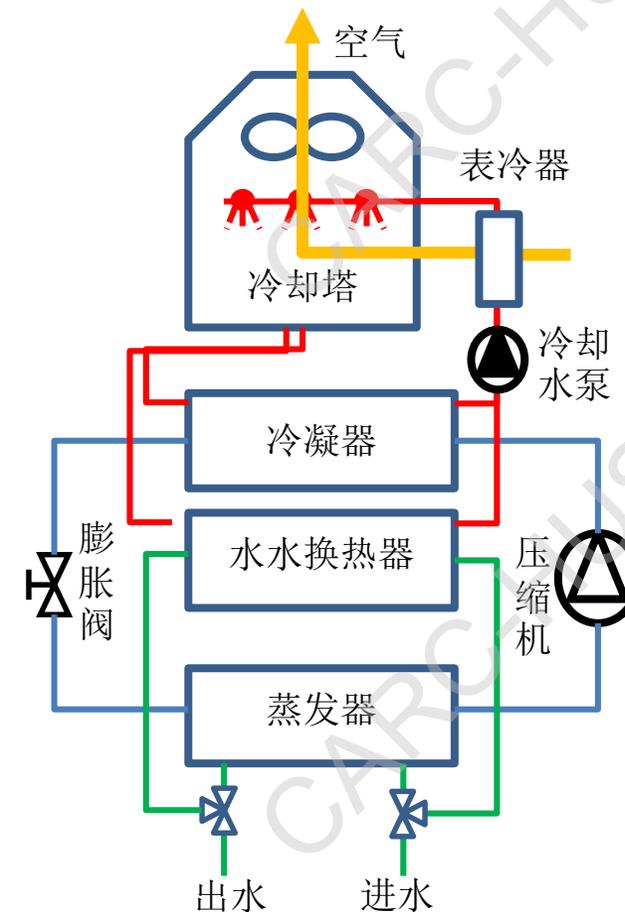
露点温度全年时长



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



项目概况：北京中科云计算中心

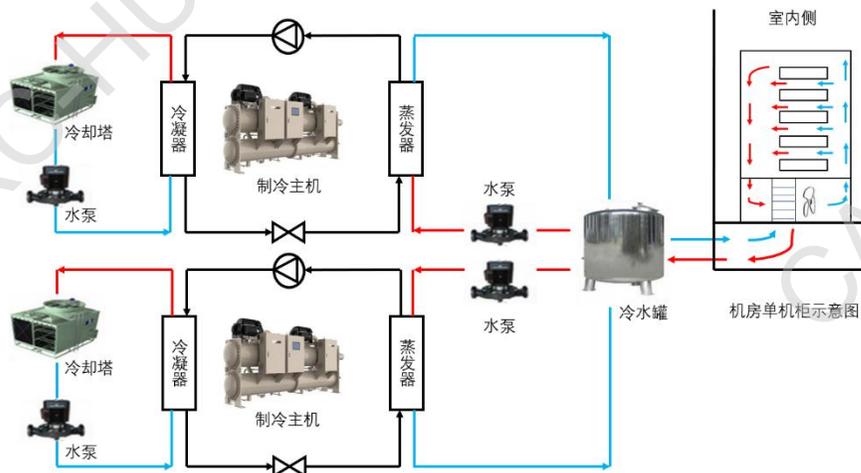


北京中科云数据中心位于北京中关村海淀新技术大厦，毗邻北京大学、硅谷电子一条街，目前主要做民用、商用等超算，数据中心共有机架315个，单机架功率为7-15kW。数据中心周围有办公室和住宅区。2014年以前，使用水冷螺杆机进行制冷，噪音太大，投诉很多，改用磁悬浮离心机组后，噪声大大降低。

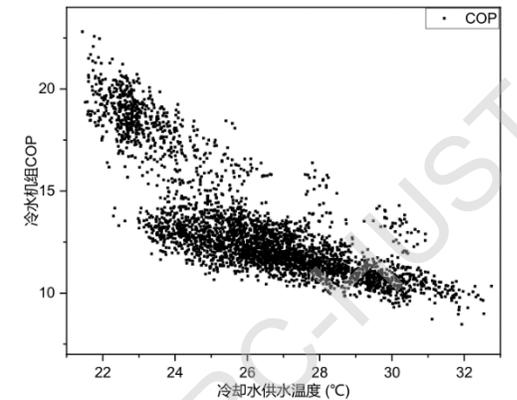
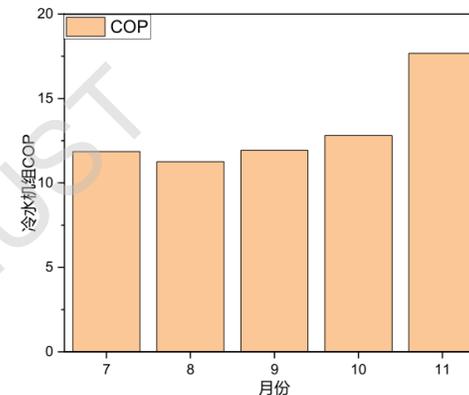
冷却系统架构

本项目冷却系统为 2N 构架，受条件影响，全年制冷无自然冷却：

- (a) 制冷机组选用 2 台海尔磁悬浮离心冷水机组；
- (b) 室内侧采用机柜级冷却方式，降低室内末端的能耗；
- (c) 冷冻液为自制油混合物，具有较高的换热效率，又保证 IT 设备安全。



运行效果：



基于总的累计制冷量和累计能耗计算，该数据中心所采用的磁悬浮离心冷水机组在 2018 年 7-11 月间的平均 COP 为 12.69。

$$COP = \frac{\sum_7^{11} (Q_1 + Q_2)}{\sum_7^{11} (W_1 + W_2)} = 12.69$$

项目概况：腾讯上海青浦数据中心（103扩容机房）

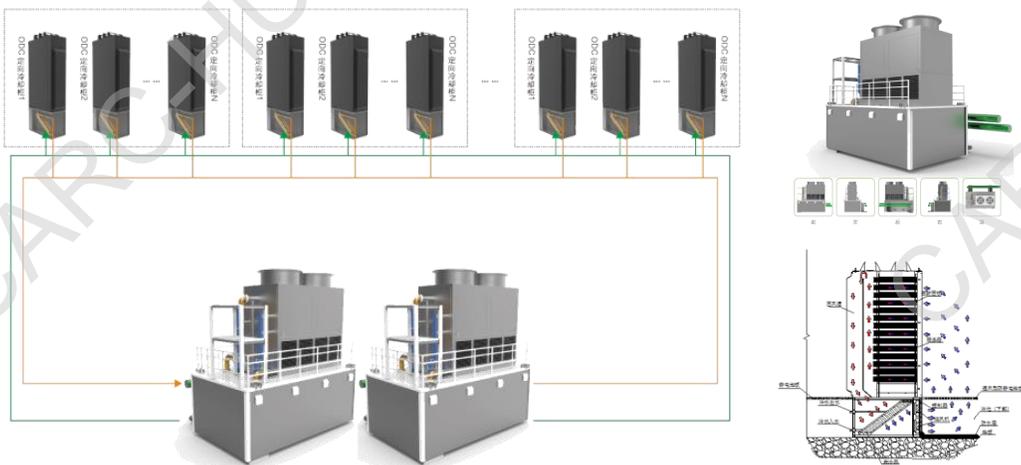
项目位于上海市青浦区，机架数量4000余台，单机架设计负荷8-12kW。机房配电采用一路市电加一路高压直流组成的双路电源配电；机房空气处理采用定制化的定向冷却机柜加分布式空气处理单元。



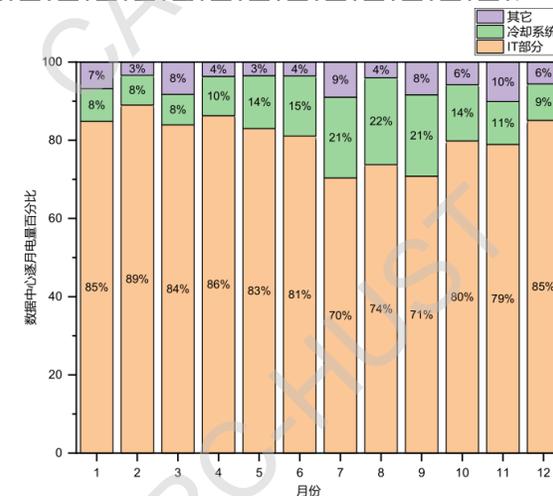
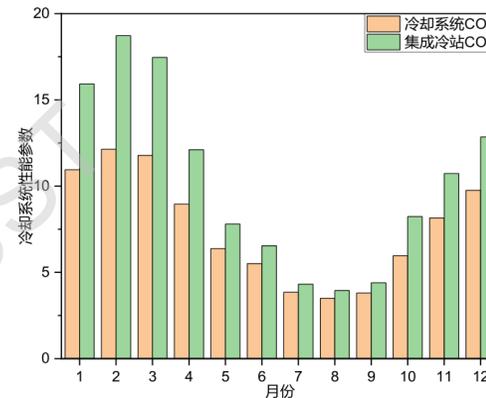
冷却系统构架：

本项目冷却系统为 2N 构架，选用海尔集成式物联高效机房：

- (a) 系统双回路设计，双冷站联合供冷且互为热备份；
- (b) 使用闭式冷却塔，同时自然冷却设计不需要阀门切换；
- (c) 定制机柜级冷却末端，22°C高温供水，同程热通道封闭；

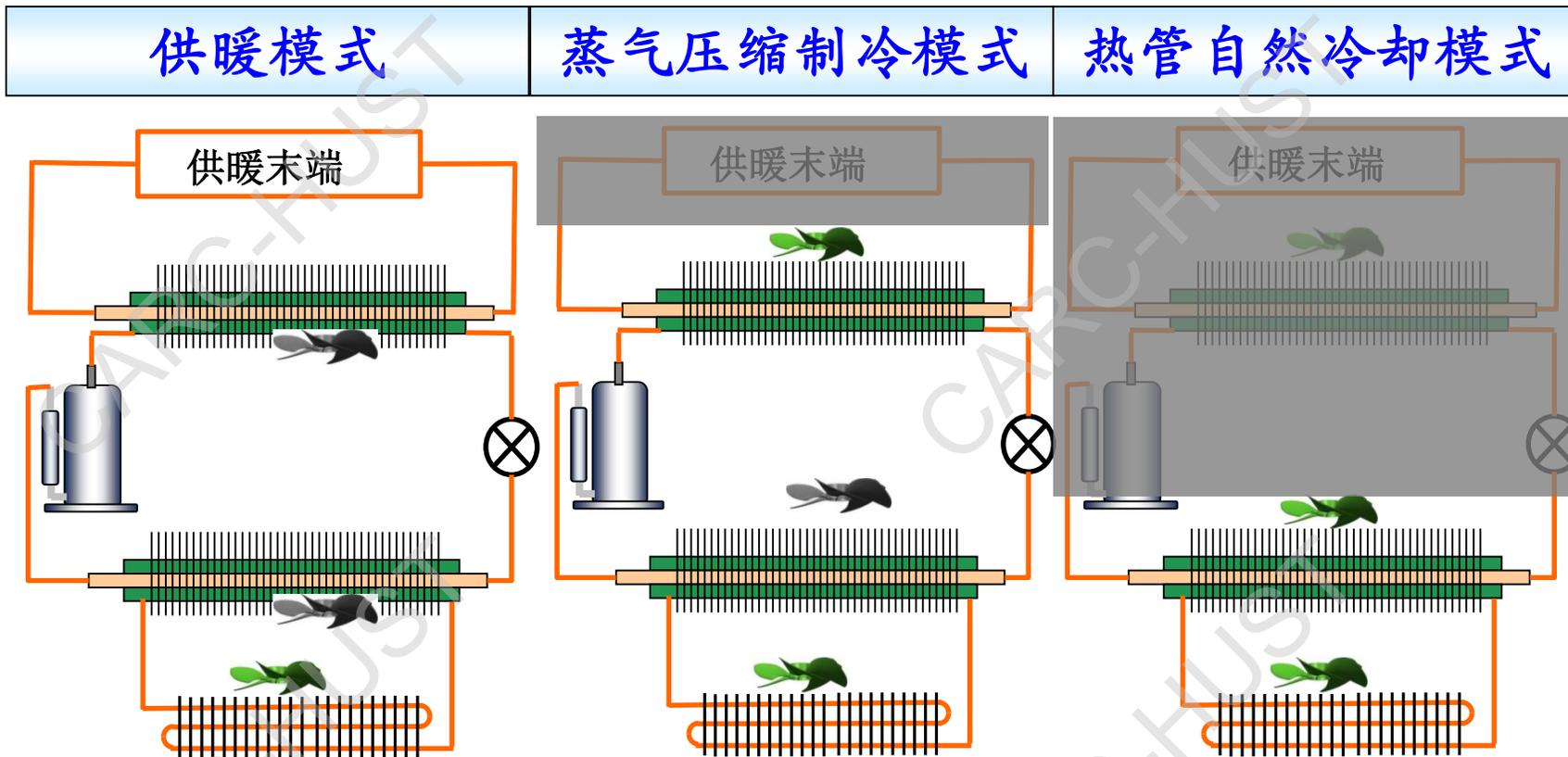


运行效果：

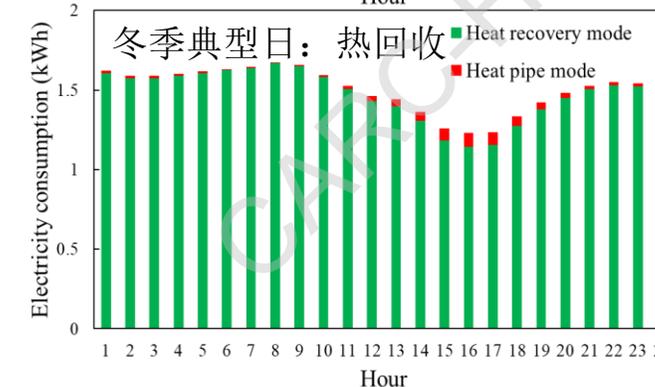
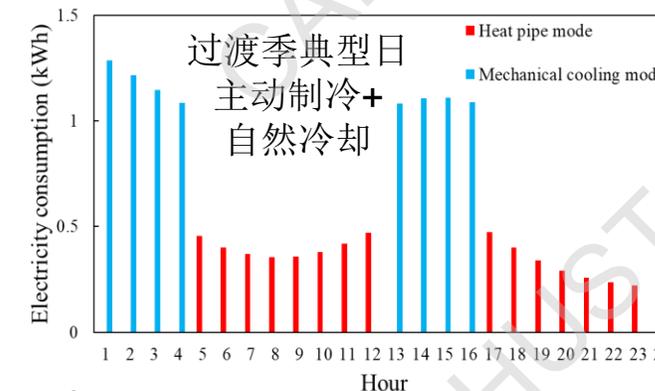
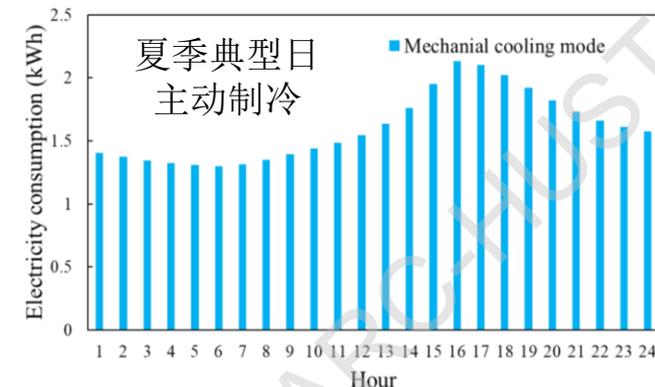


通过数据中心全年耗电量、冷却系统总耗电量（1号及2号集成冷站耗电量、DHU末端耗电量）统计数据，计算冷却系统全年综合性能系数（GCOP）和集成冷站全年综合性能系数（ACOP）分别为6.95和8.77。

$$GCOP = \frac{\sum_{1}^{12} (W_{IT} + W_{其他})}{\sum_{1}^{12} (W_1 + W_2 + W_{DHU})} = 6.95 \quad ACOP = \frac{\sum_{1}^{12} (W_{IT} + W_{其他})}{\sum_{1}^{12} (W_1 + W_2)} = 8.77$$



- 热管模式：室内外温差 20°C ，制冷量 6.65kW ， $\text{EER} > 20$
- 热回收模式：制取 50°C 供暖用水，制热量 6.05kW ，制热 $\text{EER} > 4.0$



项目概况：上海某数据中心

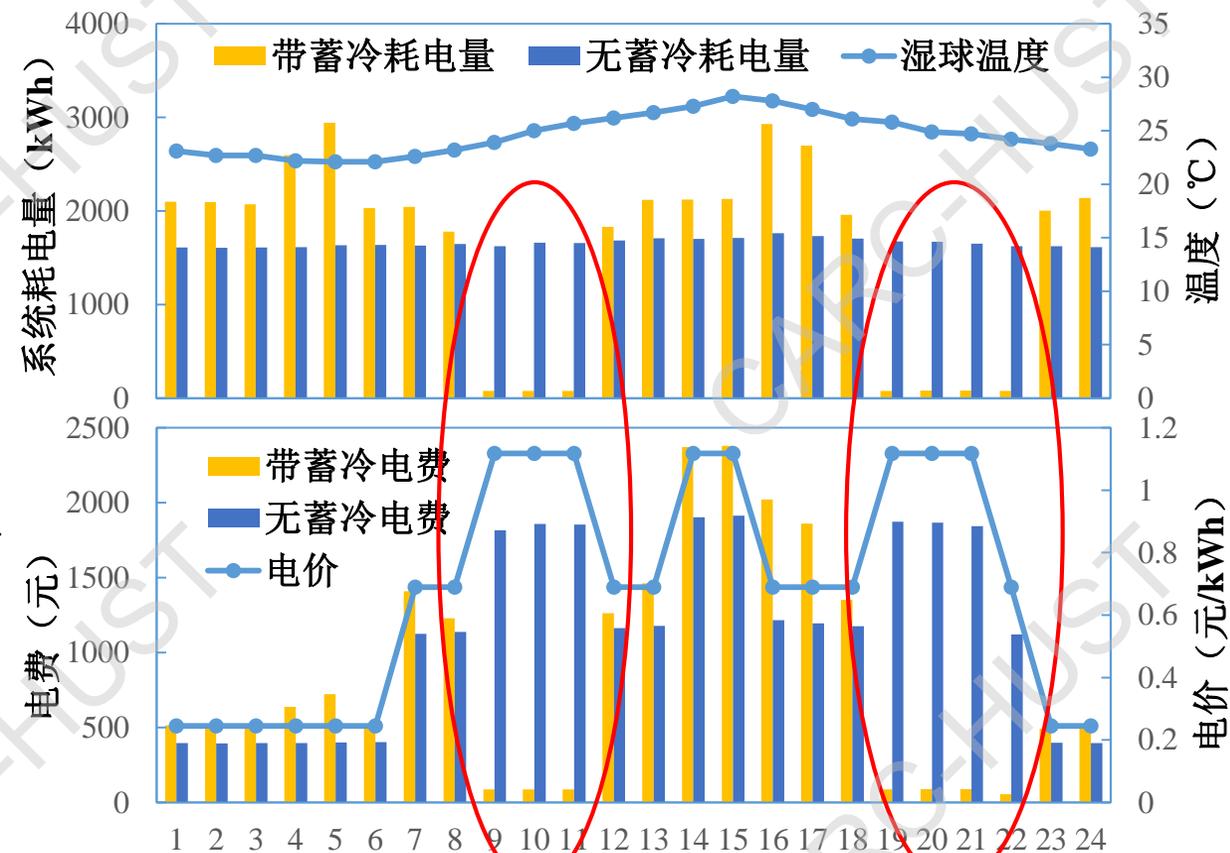
建筑面积21500m²，数据中心面积12530m²，冷负荷19743KW，系统采用6台1600RT离心式冷水机组。采用开式非承压蓄水罐，体积5154m³，供回水温度14-21℃，蓄冷量41959KWh。削峰填谷并可作为应急冷源使用。



水蓄冷系统优势：

- 1、蓄冷罐本身也是**备用冷源**，整个**系统安全性更高**；
- 2、大型蓄冷罐可作为数据中心前期**低负荷调蓄使用**，**减掉小主机配置**；
- 3、同时**兼备应急冷源**，**省去了这部分投资**；
- 4、夜间蓄冷备用冷机可以满载，**同时夜间温度较低**，**冷却塔、冷机效率更高**。

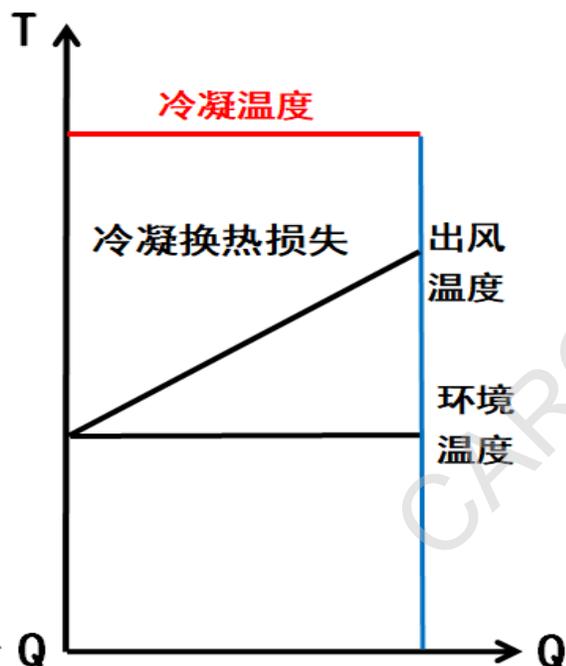
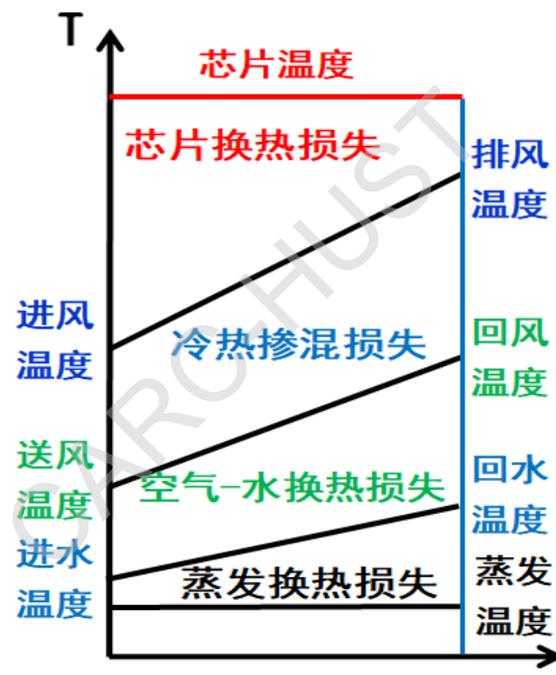
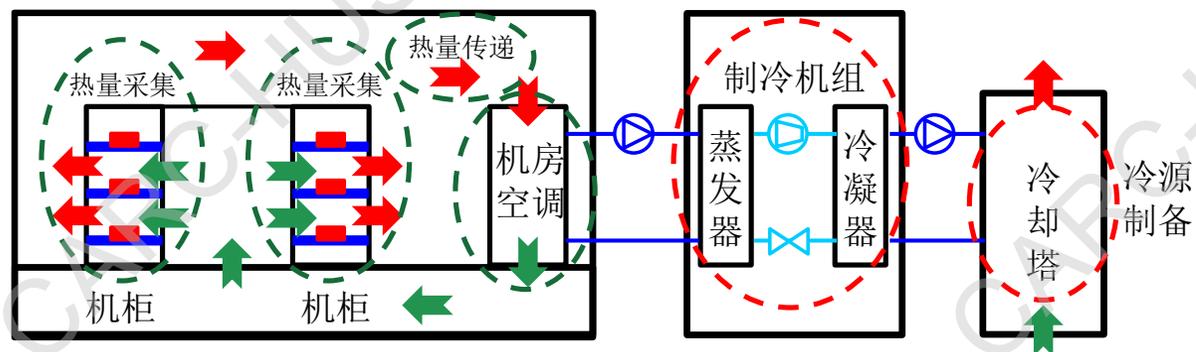
运行效果：典型日GCOP：3.125(蓄冷)/3.025(无蓄冷)



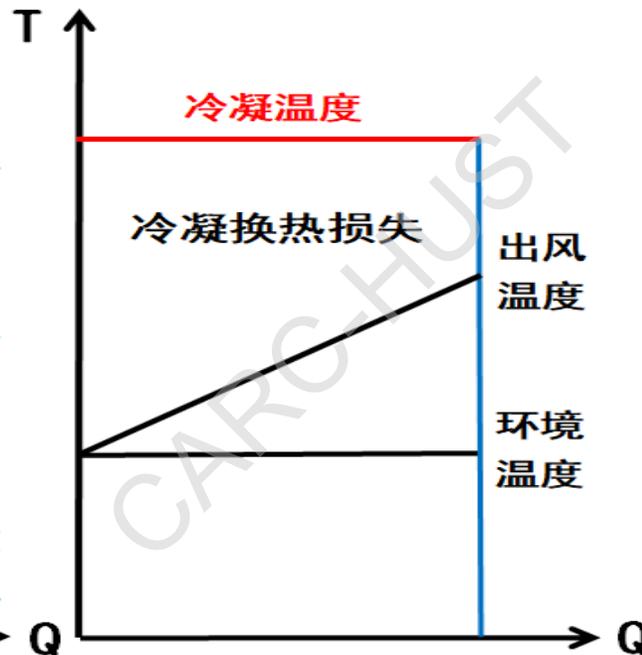
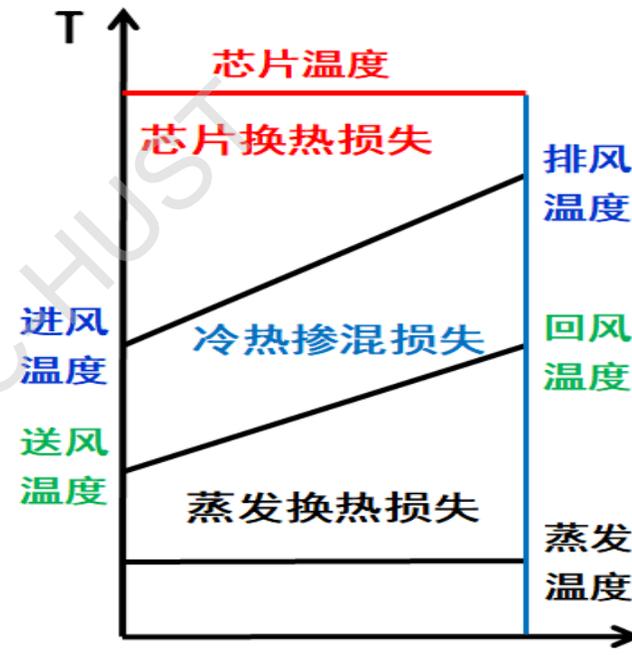
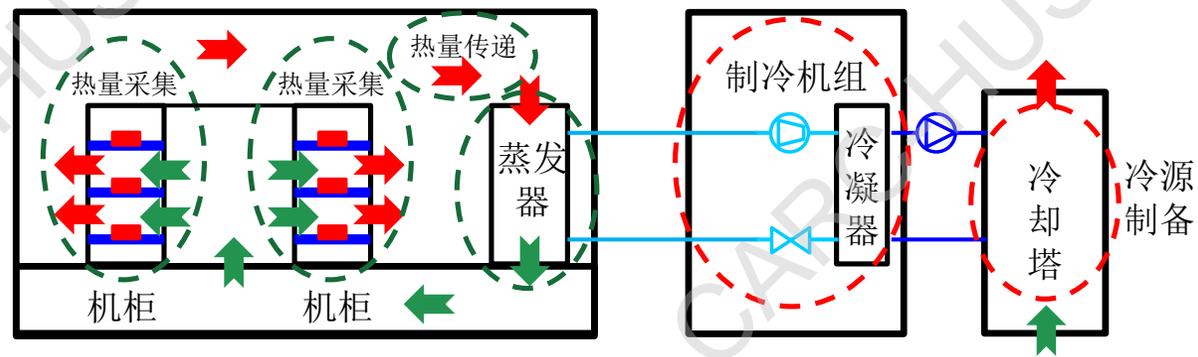
典型日电费：20332元(蓄冷)/27415(无蓄冷)，下降25.8%

全年水蓄冷空调系统供冷运行约为275天，自然冷却数约为90天，全年冷源系统耗电量约为 1.14×10^7 kWh，与常规空调系统相比年节省运行费用约192万元，经济效益显著。

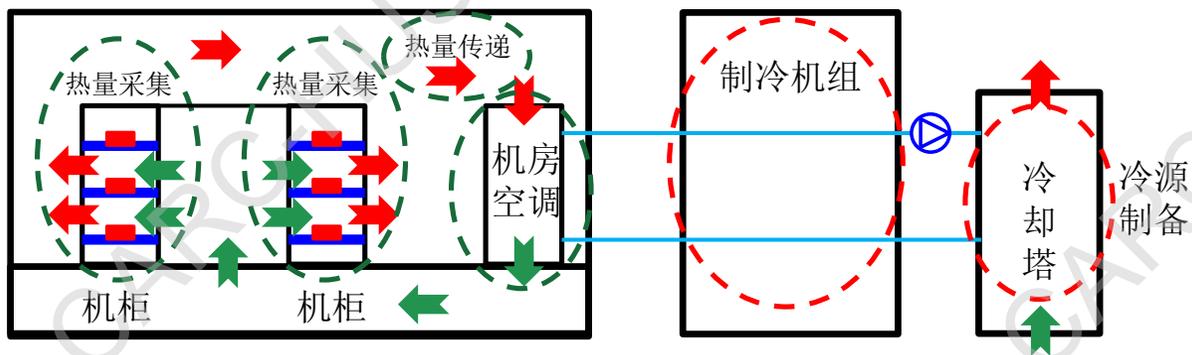
(1) 冷冻水系统



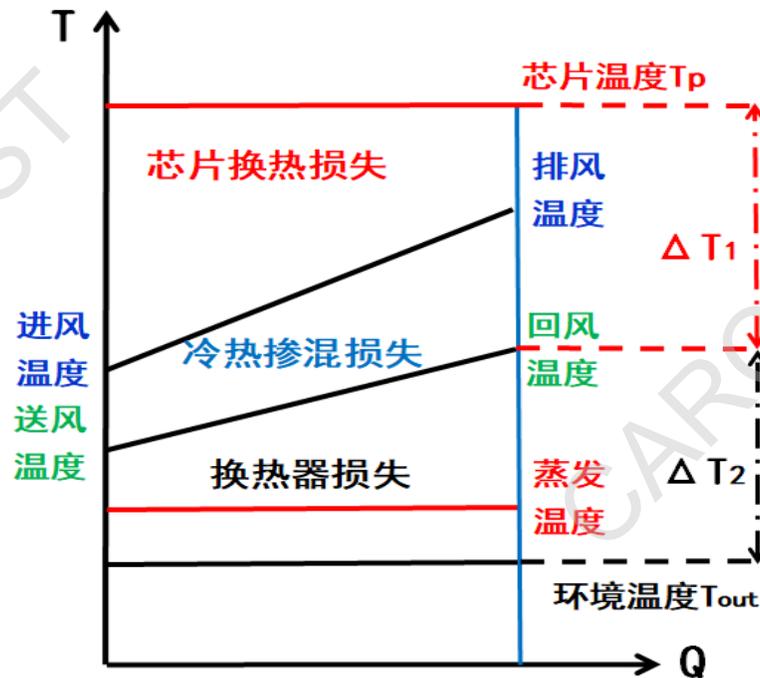
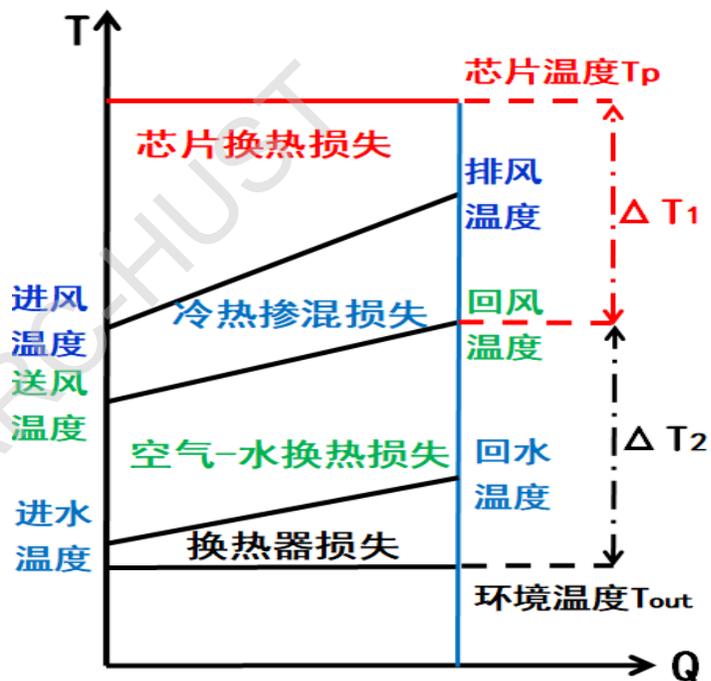
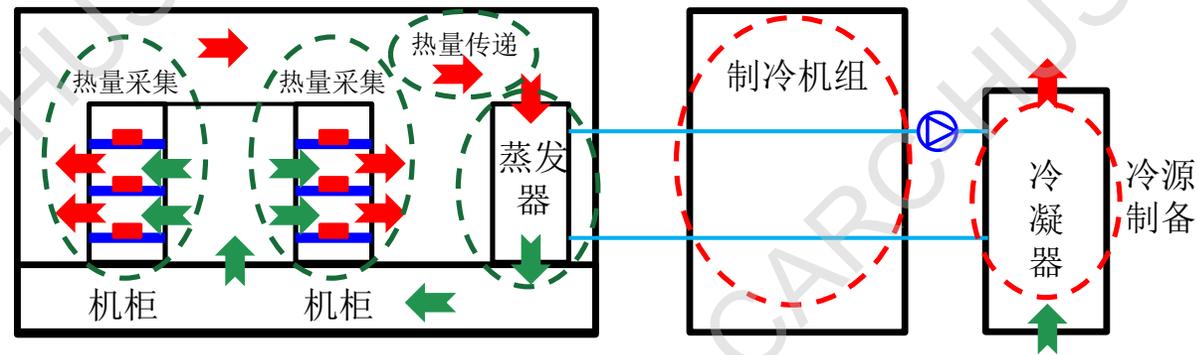
(2) 氟利昂直供系统



(3) 自然冷却系统—冷水系统



(4) 自然冷却系统—回路热管系统



中国制冷学会三项团体标准

数据中心用冷水机组性能测试与评价方法

工况	供水温度°C	回水温度°C
高水温工况	18.0	24.0
中水温工况	15.0	21.0
低水温工况	12.0	18.0

		放热侧试验工况 (°C)				
		A	B	C	D	E
风冷式	入口干球温度, °C	35.0	25.0	15.0	5.0	-5.0
水冷式*	冷却水进口温度, °C	30.0	24.0	T _s **		

$$ACOP = \frac{k_A Q_A + k_B Q_B + k_C Q_C}{k_A P_A + k_B P_B + k_C P_C}$$

$$ACOP = \frac{(k_A Q_A + k_B Q_B + k_C Q_C + k_D Q_D + k_E Q_E)}{(k_A P_A + k_B P_B + k_C P_C + k_D P_D + k_E P_E)}$$

数据中心冷却系统综合COP测试与计算方法

→ 综合COP: GCOP = (数据中心总耗电 - 冷却耗电) / 冷却系统耗电

不同地区数据中心冷却系统综合COP参考值

→ 严寒地区/寒冷地区/夏热冬冷地区/夏热冬暖地区、温和地区

总结与展望

数据中心

国家和社会的发展对数据中心行业的需求是**不可逆转的**

“2030碳达峰、2060碳中和”对数据中心的节能要求是**十分迫切的**

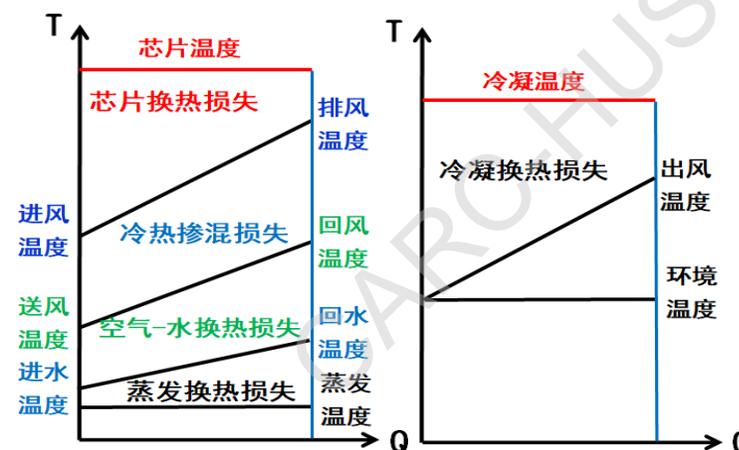
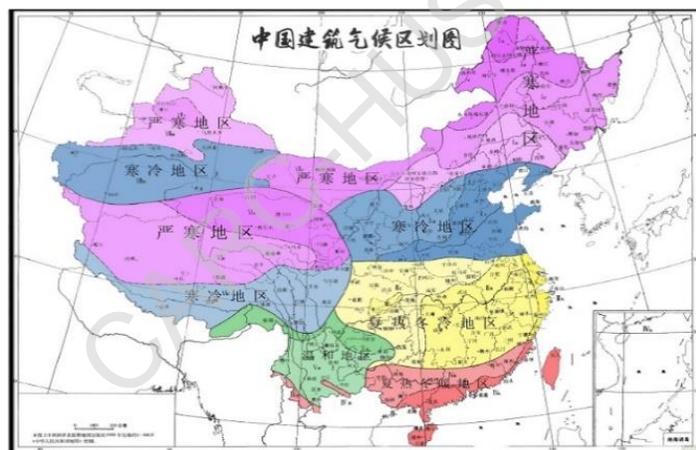
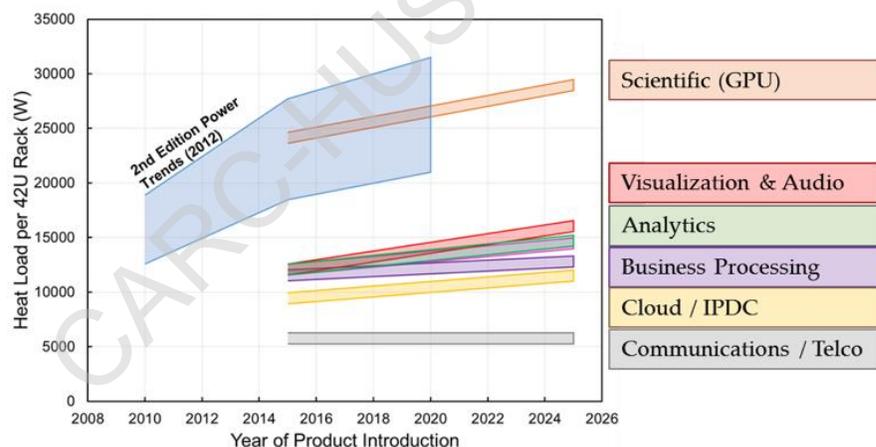
数据中心节能对冷却系统的要求是**全方位的**

冷却技术

按需设计

因地制宜

全局优化



9. 广告

中国数据中心冷却技术年度发展研究报告 2020?

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

中国数据中心冷却技术
年度发展研究报告
2018

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

中国数据中心冷却技术
年度发展研究报告
2017

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

中国数据中心冷却技术
年度发展研究报告

2016

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

9. 广告

数据中心用磁悬浮压缩机 与制冷机组白皮书

数据中心用磁悬浮压缩机 及制冷机组白皮书

Maglev Compressor and Chiller for Data
Center Cooling White Paper



中国制冷学会
2021年4月

《中国数据中心冷却技术年度发展研究报告2020》发布会 《数据中心用磁悬浮压缩机及制冷机组白皮书》发布会 ——暨数据中心冷却节能技术论坛

时间：2021年4月8日，09:30-12:00

地点：上海新国际博览中心，E1-M16会议室

**主持人：江亿 教授，中国工程院院士，中国制冷学会理事长，
清华大学建筑节能研究中心主任**

Thank you



邵双全

华中科技大学 教授

13051252727

shaoshq@hust.edu.cn