



## 面向数据中心高效散热的泵驱两相冷却技术 的研究进展

汇报人： 方奕栋 副教授

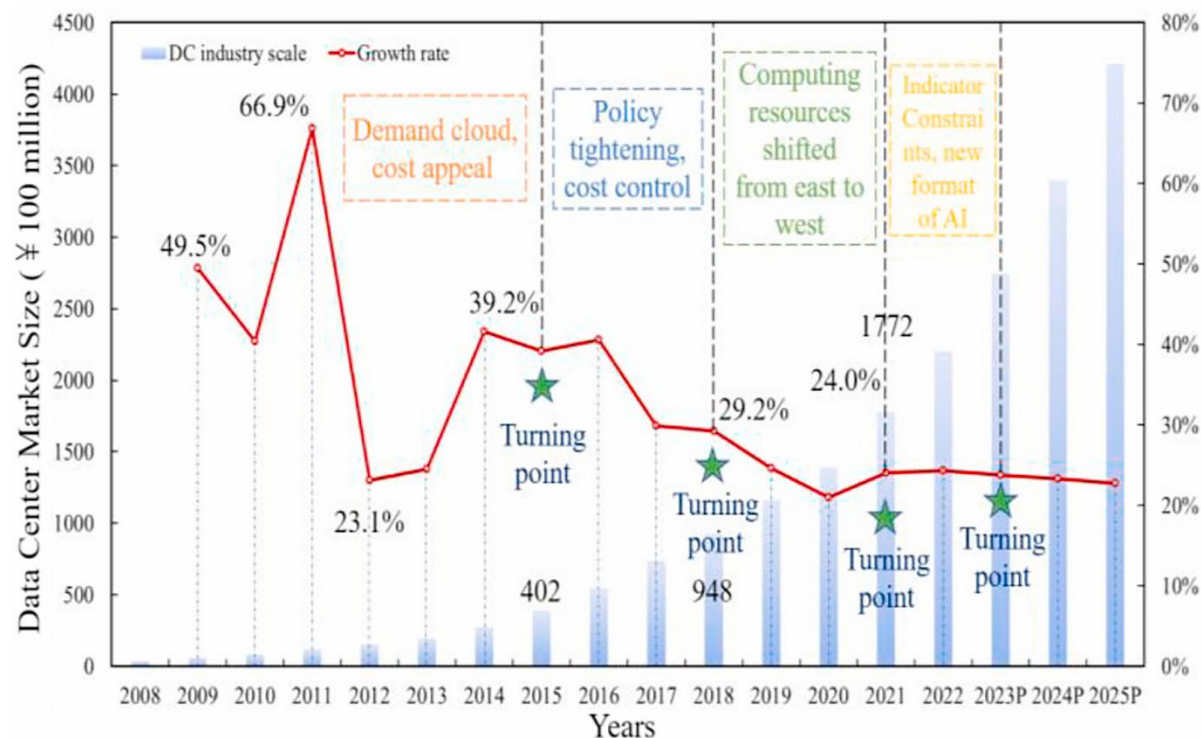
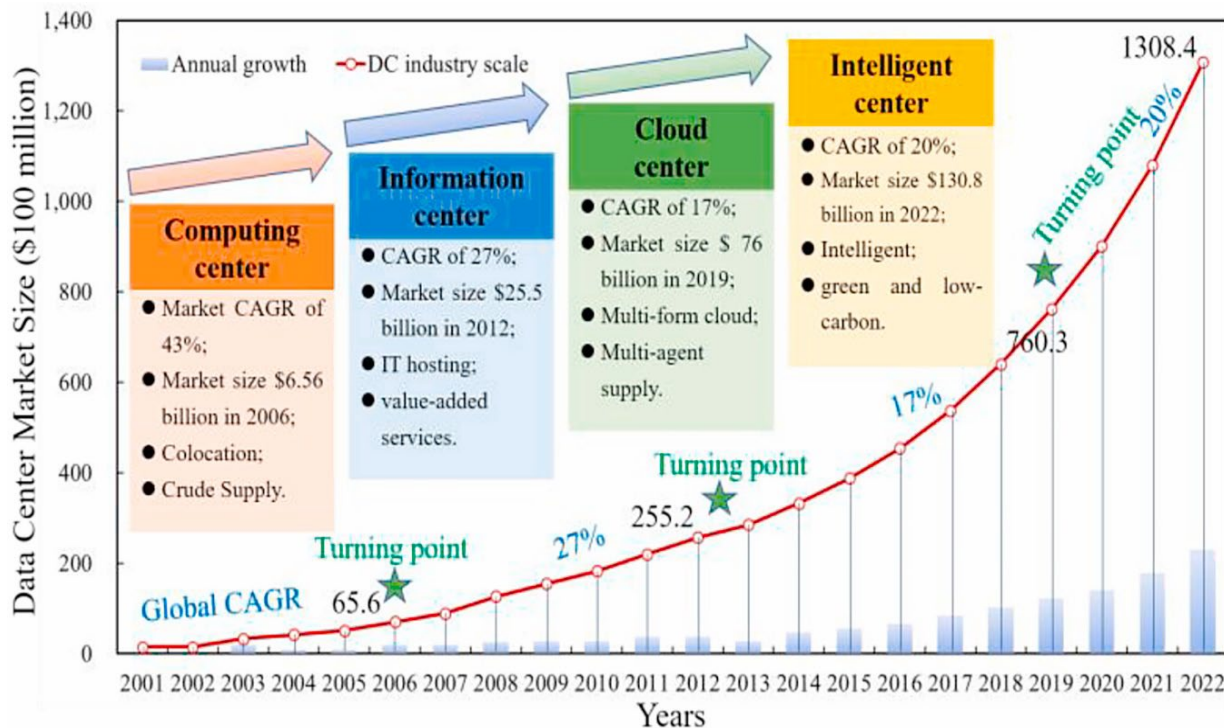
单 位： 上海理工大学 能源与动力工程学院  
上海市多相流动与传热重点实验室

2024 年 10 月 25 日

# 数据中心的市场规模



□ **互联网/人工智能行业**的发展促进了数据中心市场的爆发式增长



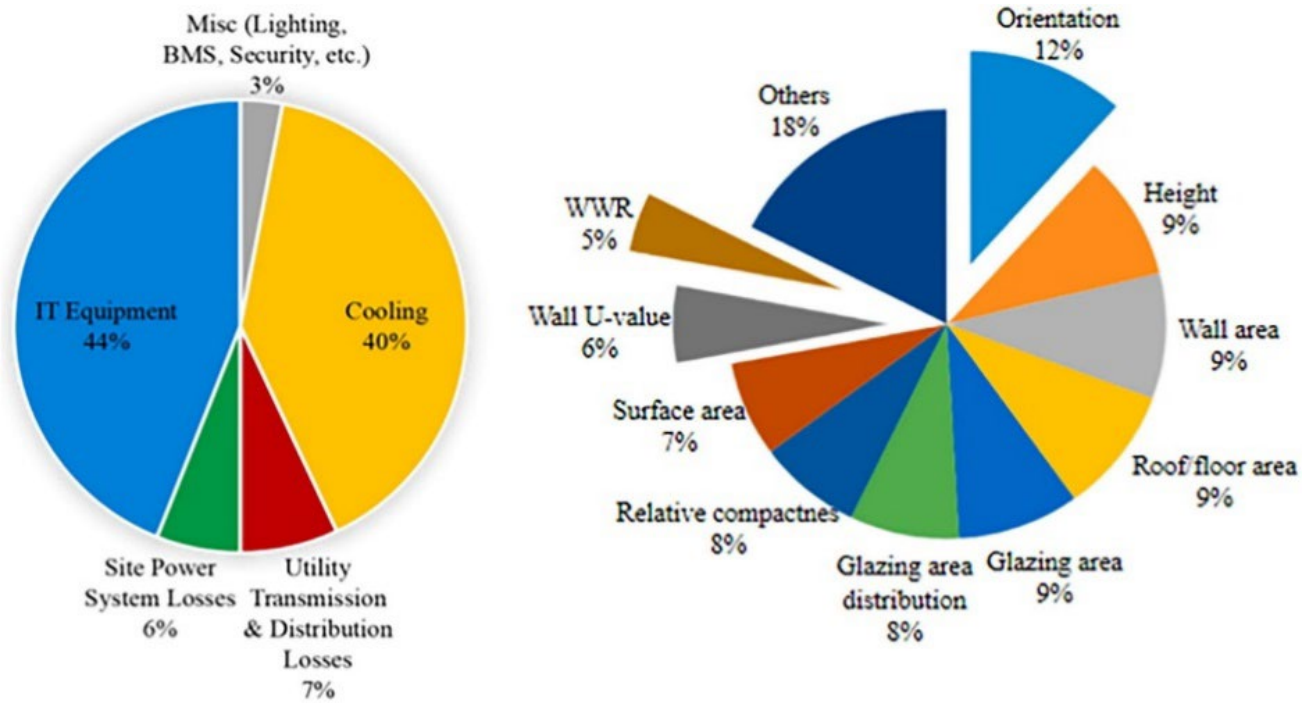
□ 国内数据中心产业规模已经突破**2200亿人民币**，并持续保持高速增长

□ 预计 2023 年至 2030 年的复合年增长率 (CAGR) 将达到 **18.4%**

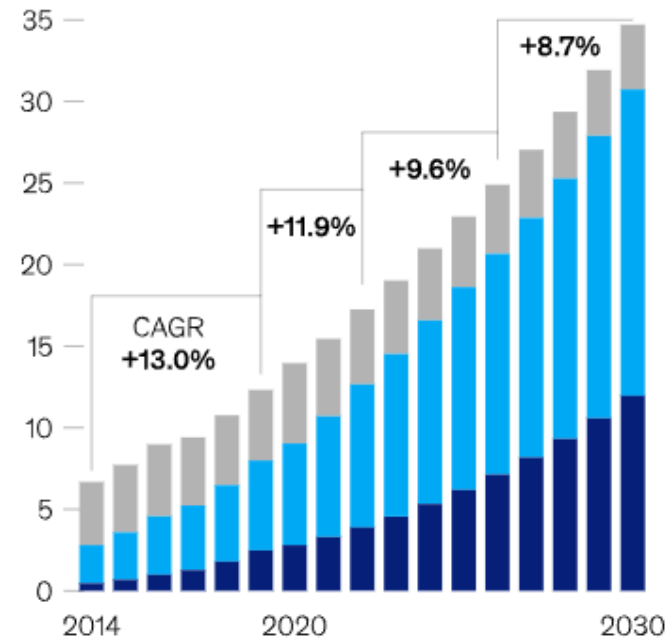


# 数据中心高效散热的重要性

## □ 数据中心能耗分布



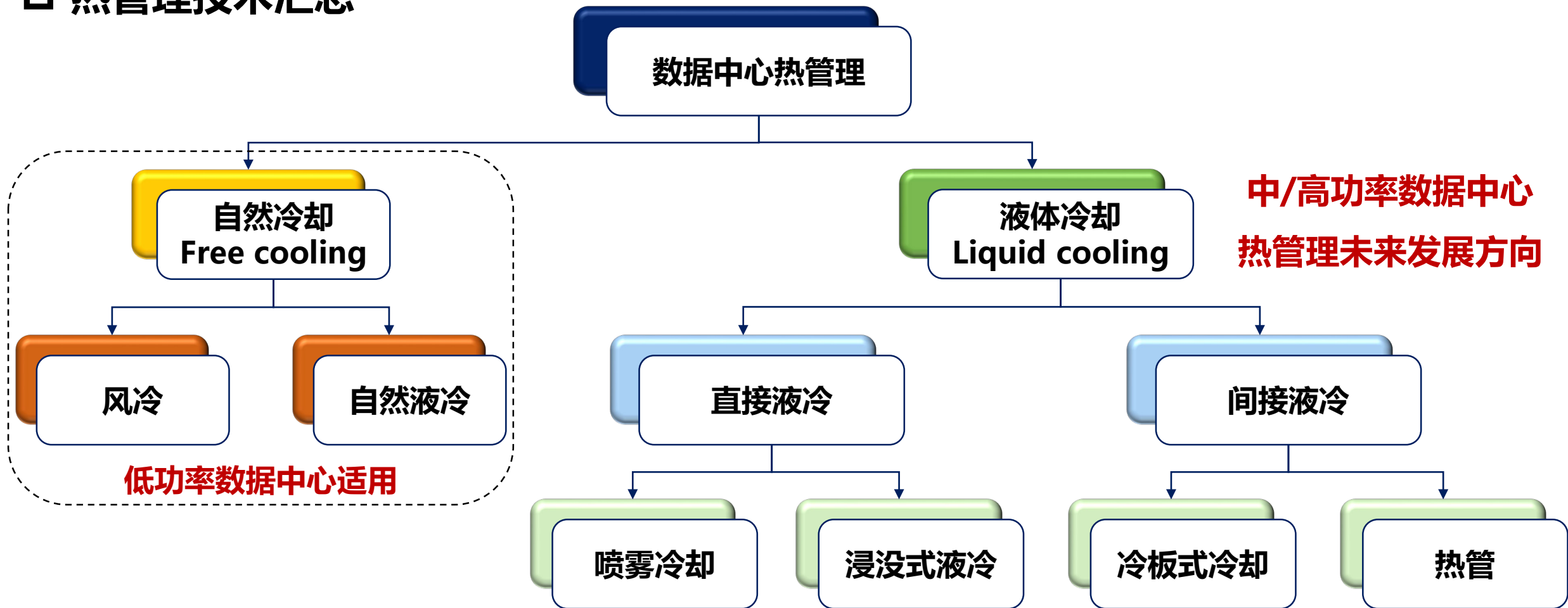
Data center power consumption, by providers/enterprises,<sup>1</sup> gigawatts



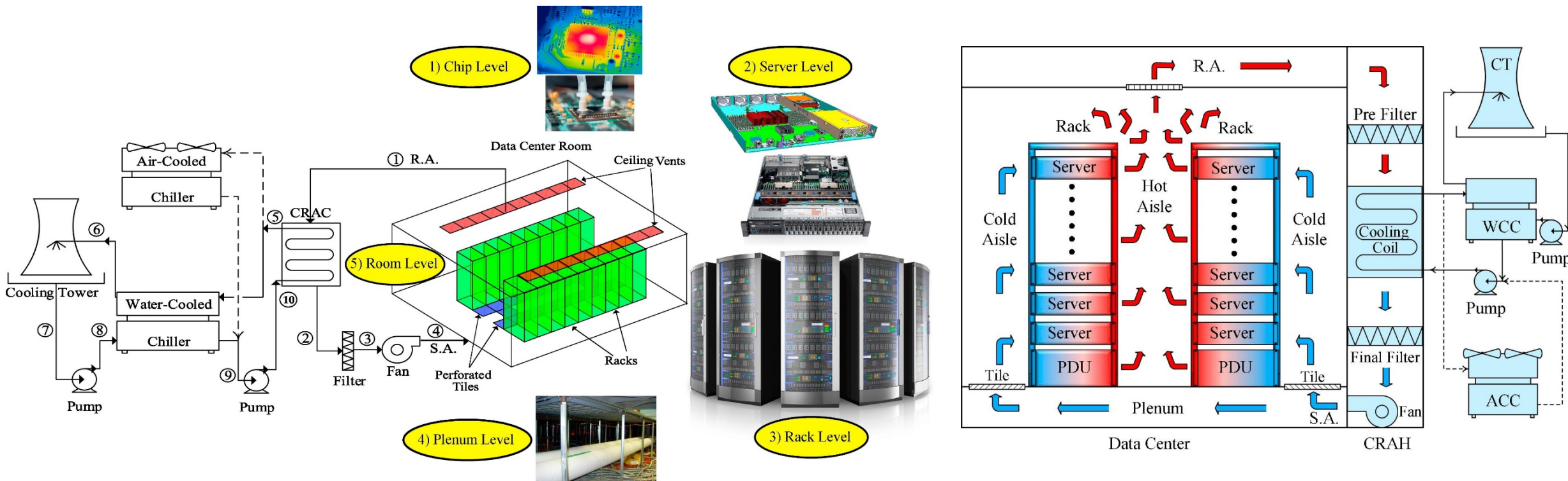
□ 制冷/散热设备能耗约占数据中心总能耗的**30%-50%**

□ 预计全国数据中心散热产生的**年均碳排放3200~5600吨**

## □ 热管理技术汇总



## 空气冷却技术 (Air-cooling)



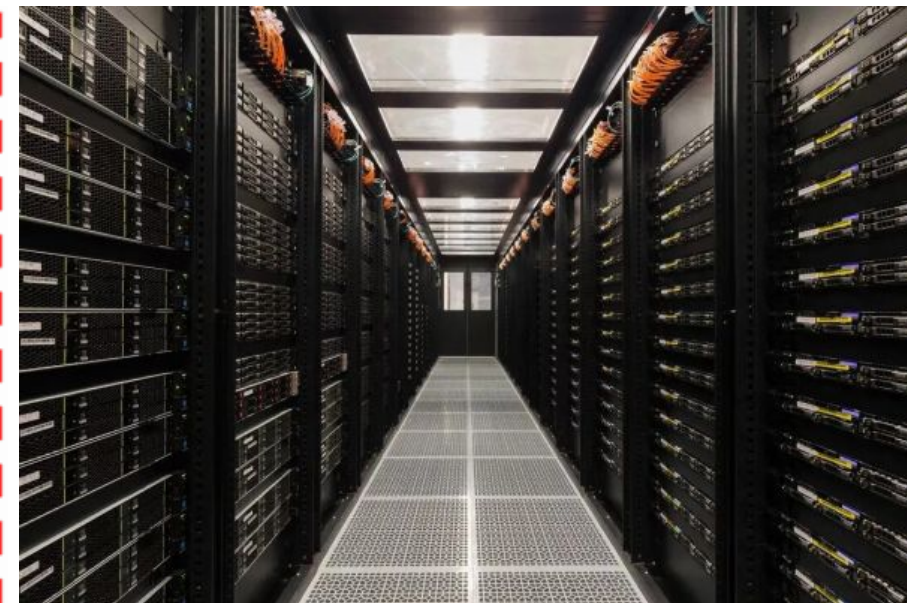
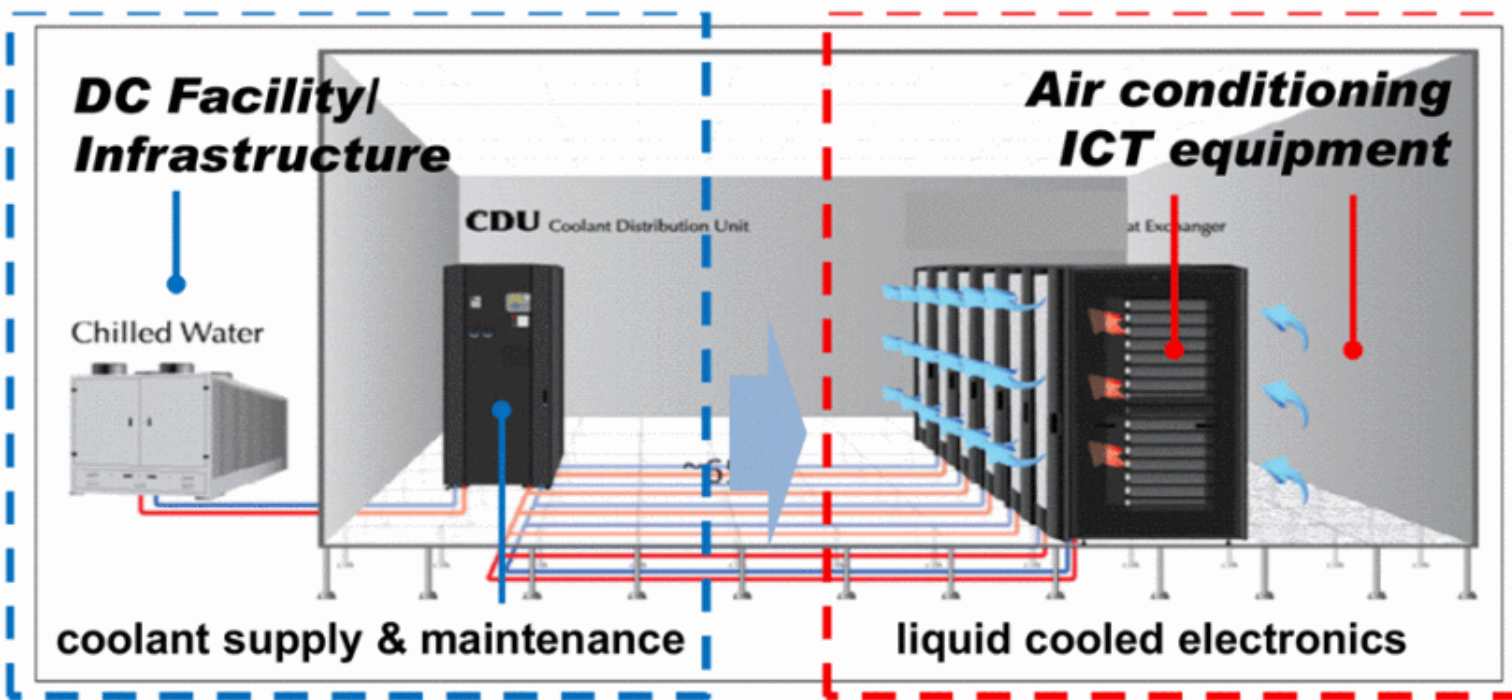
传统数据中心机房空调：通过底部/顶部风道形成冷空气循环

外部冷源：空气（蒸汽压缩制冷循环）、湖泊/河流水（水源）

# 现有的数据中心热管理技术



## □ 液体冷却技术 (Liquid cooling)

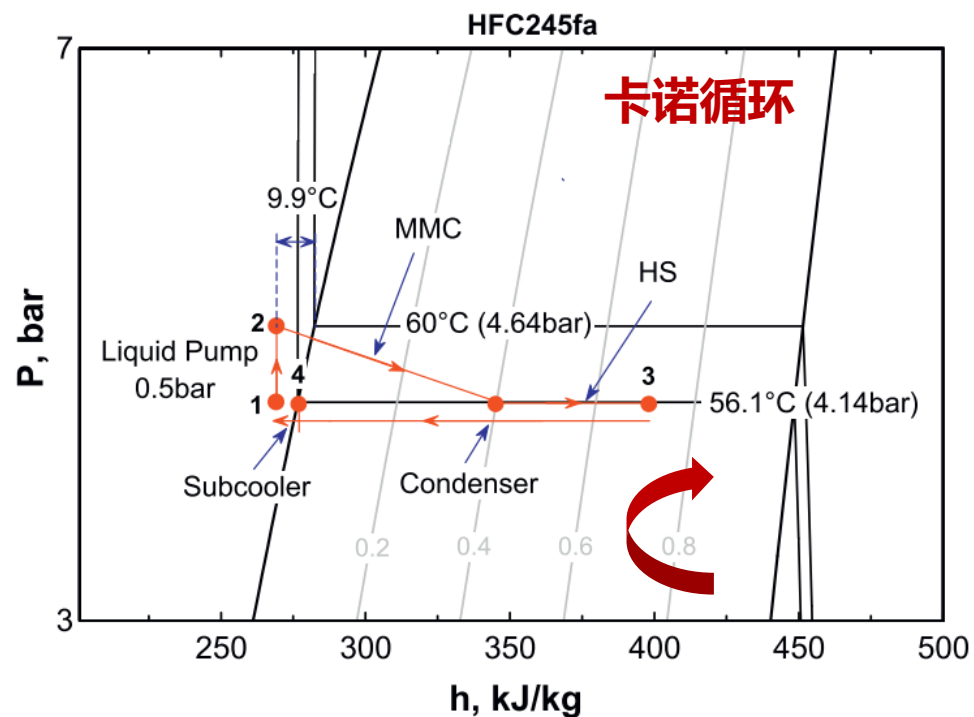
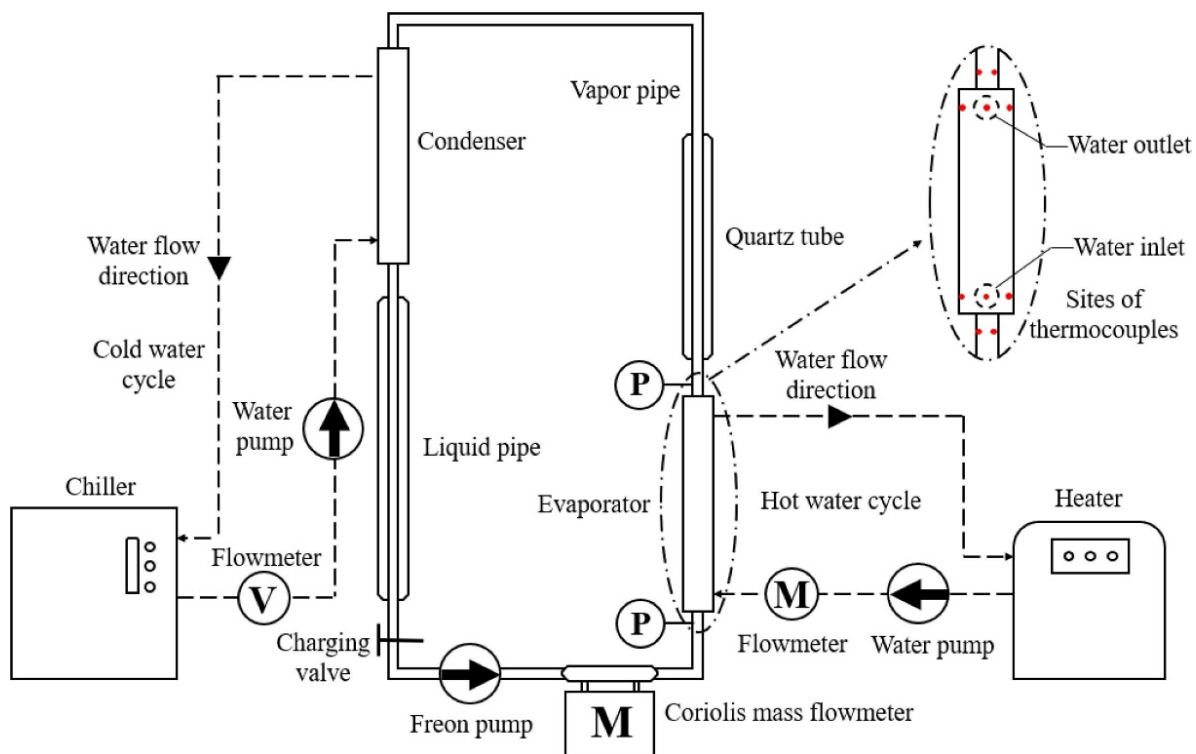


京东云数据中心

- 单相强制对流换热：将冷却液引入机组冷却通道，外部由冷水机组提供稳定冷量
- 适用于中/高热流密度，系统运行噪音和占地空间较小



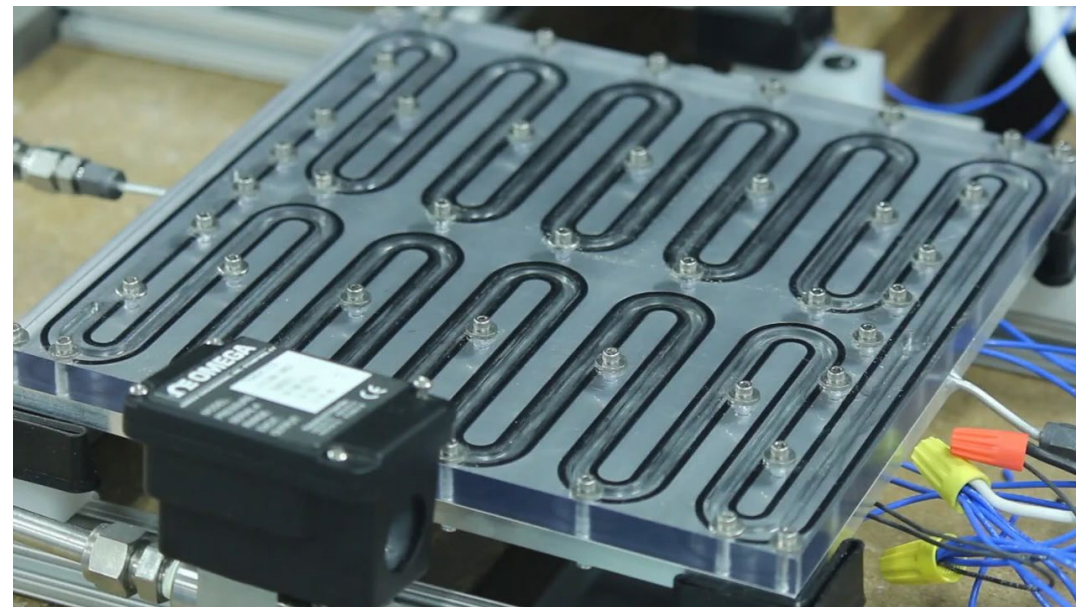
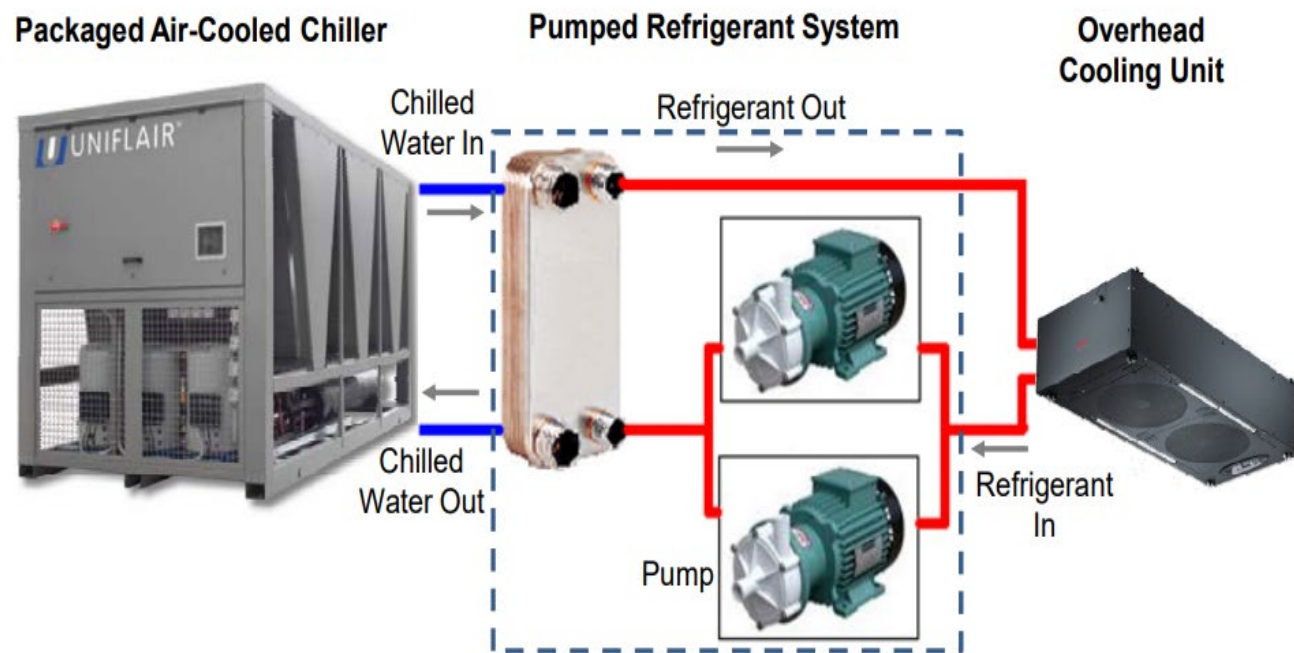
## □ 泵驱两相冷却技术 (Pump-driven two-phase cooling)



□ 单相液冷的改进：将冷却水**替换为低压制冷剂**，利用工质的相变换热

□ 比单相液冷系统更为节能，泵送**功率仅为单相10%~20%**，充注量更低

## □ 泵驱两相冷却技术 (Pump-driven two-phase cooling)



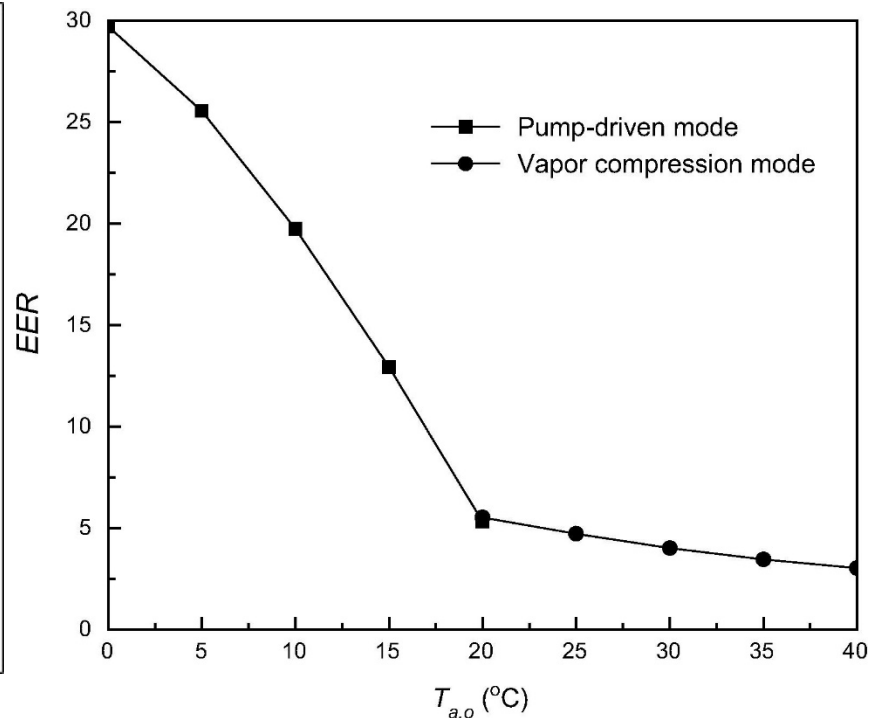
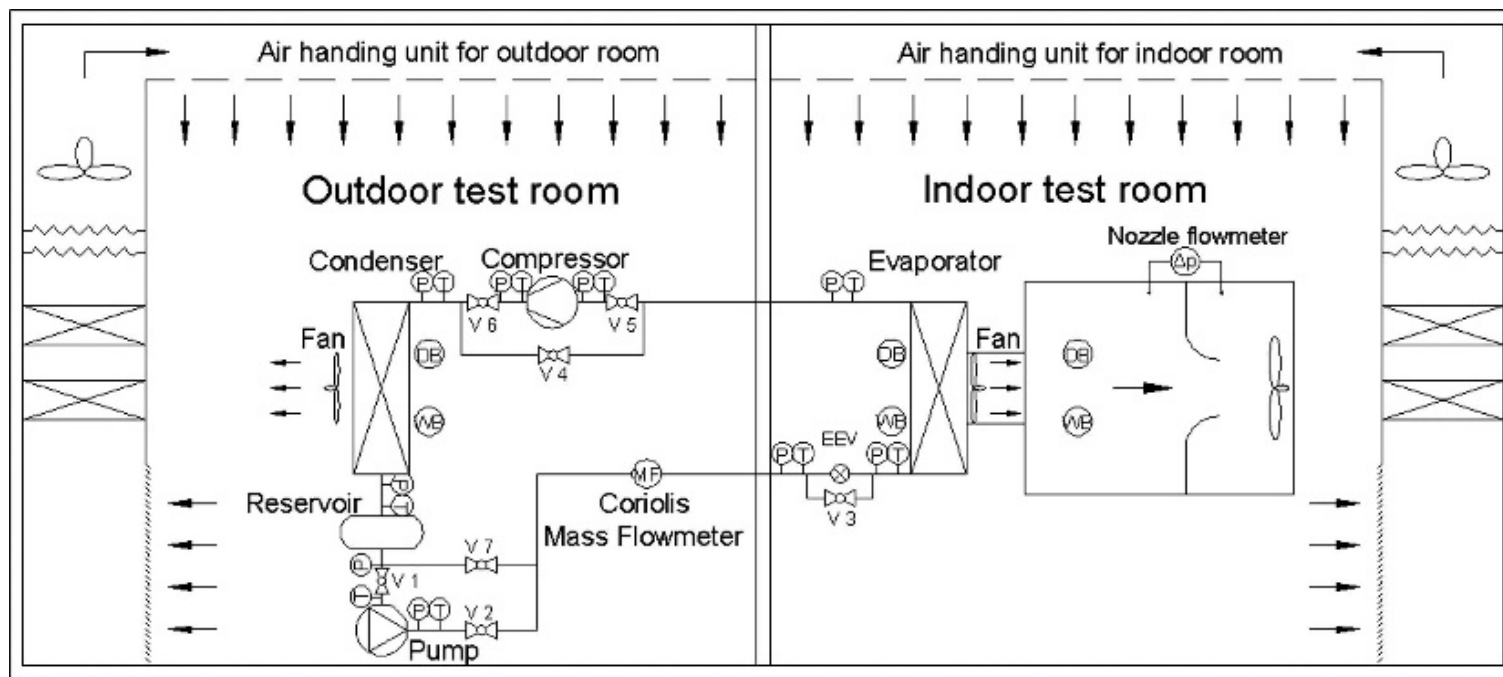
Advanced Cooling Technology

□ 制冷剂直接进入冷却通道，与服务器发生非接触式相变换热 (流动沸腾)

□ 制冷剂吸热相变后，进入外部冷凝器，与冷冻水换热 (冷凝)



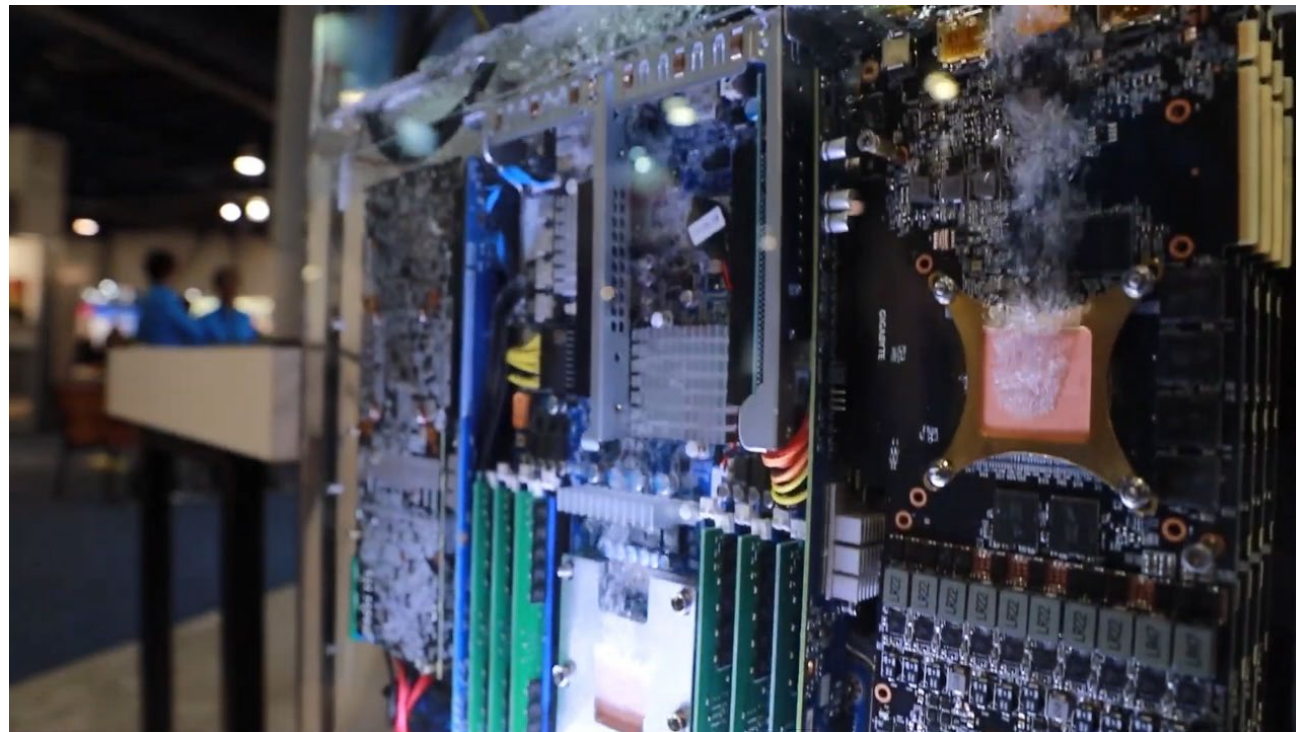
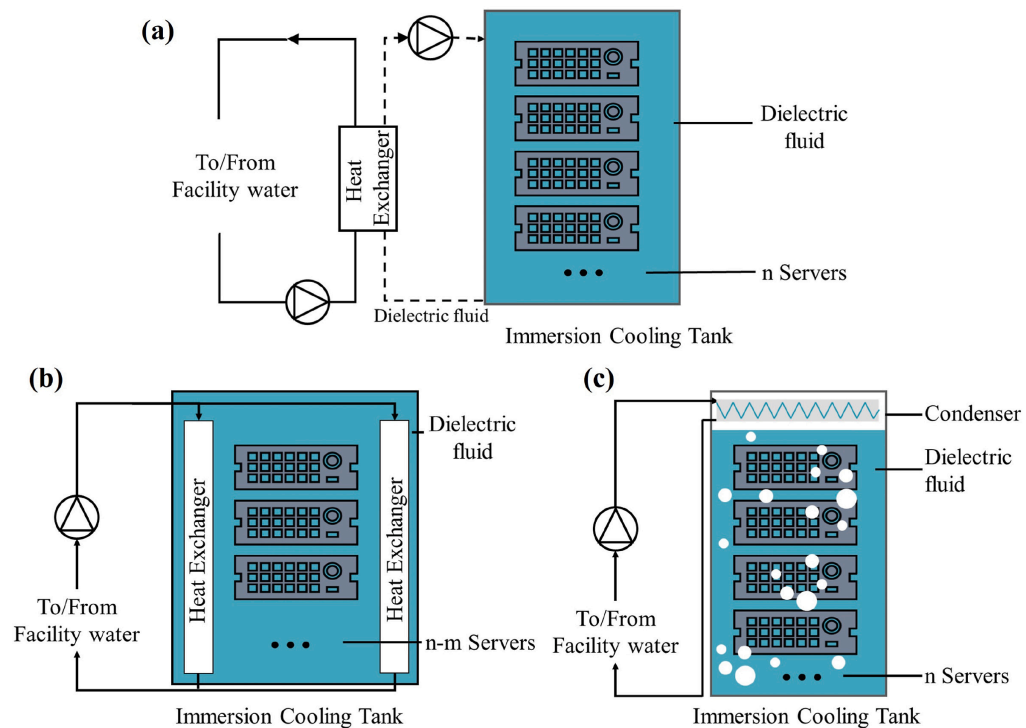
## □ 泵驱两相冷却技术 (Pump-driven two-phase cooling)



□ 当室外温度较低时，将传统蒸汽压缩模式切换为泵驱动模式

□ 泵驱动模式能耗更低，外温0 °C时系统EER≥5，远高于蒸汽压缩制冷系统

## □ 浸没式冷却技术 (Immersion cooling)

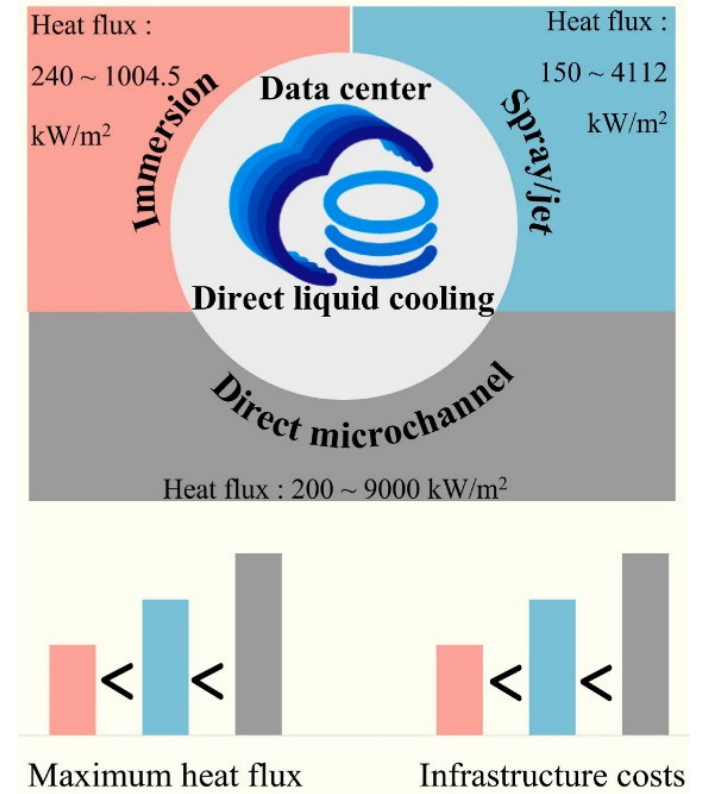
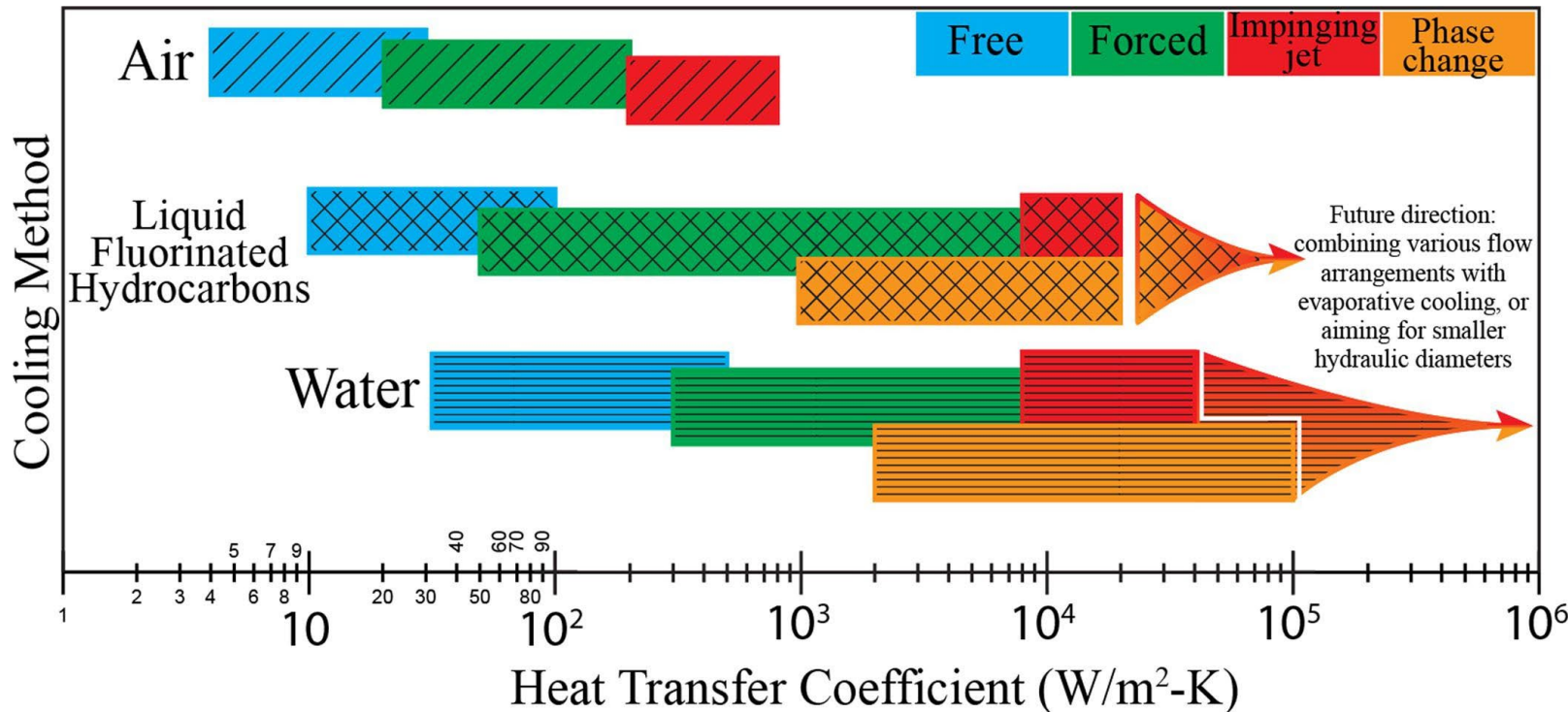


□ 单相浸没：绝缘冷却液，矿物油等；需要泵驱+外部散热器

□ 两相浸没：低沸点制冷剂（HFE-7000、R1233zd）；顶置冷凝盘管

# 数据中心热管理技术的未来发展趋势

## 不同热管理技术的对比

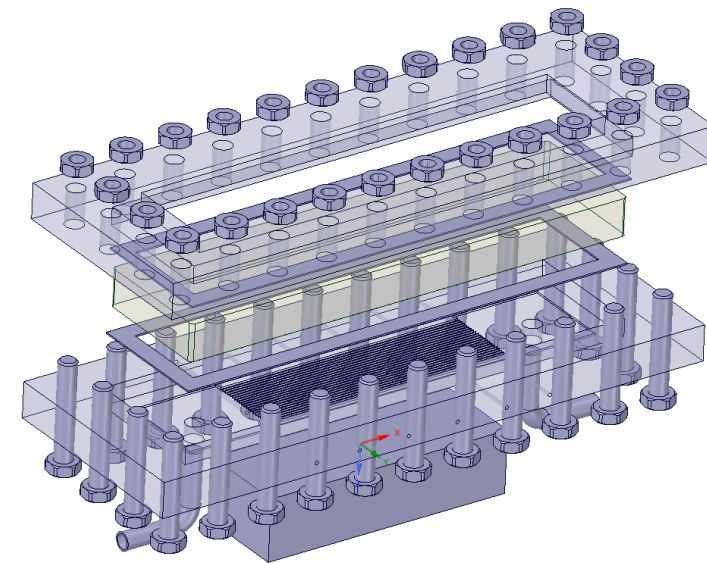
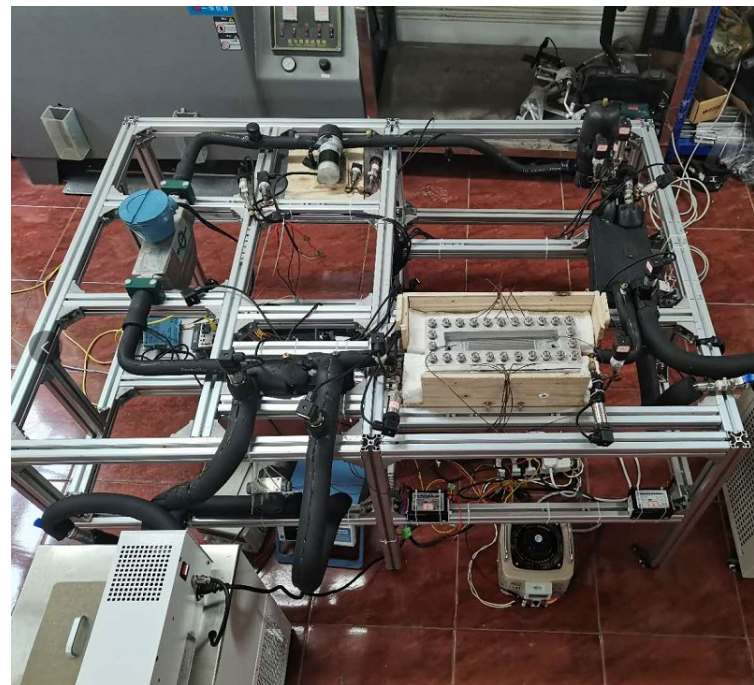
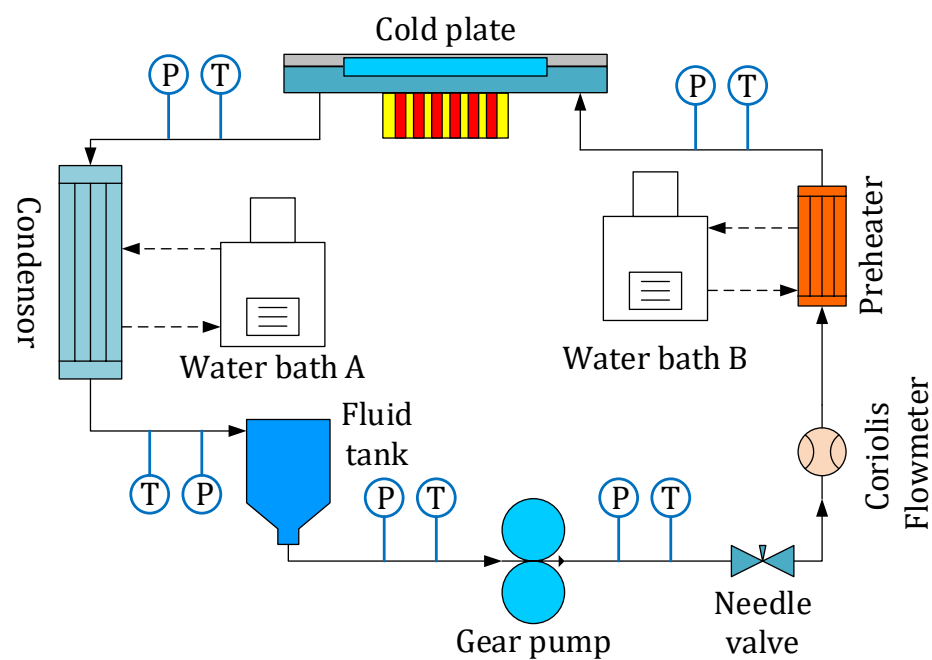


两相液冷技术将是未来数据中心热管理的主要技术路线

关键问题：两相换热系统/器件设计 (科学研究) + 设备改造 (工程应用)



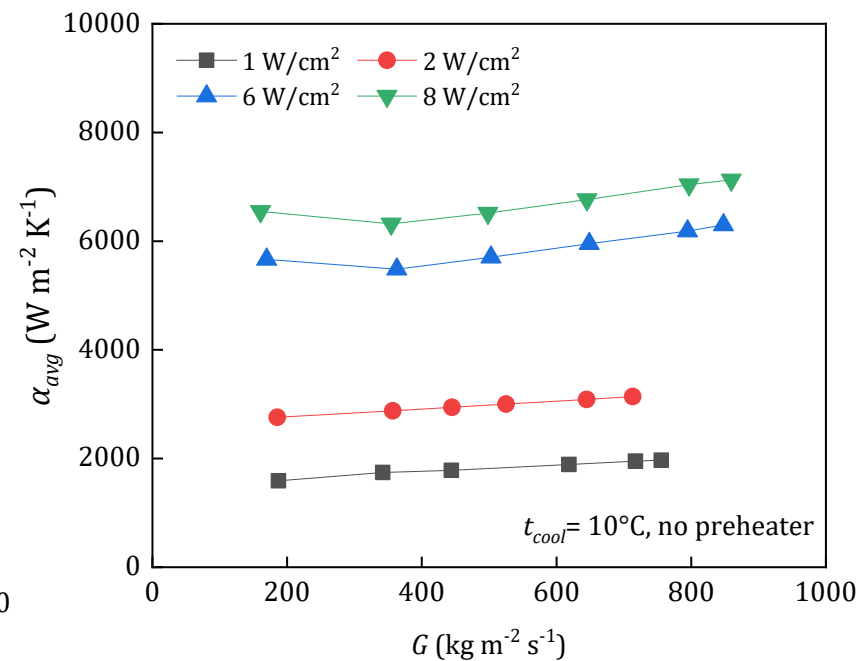
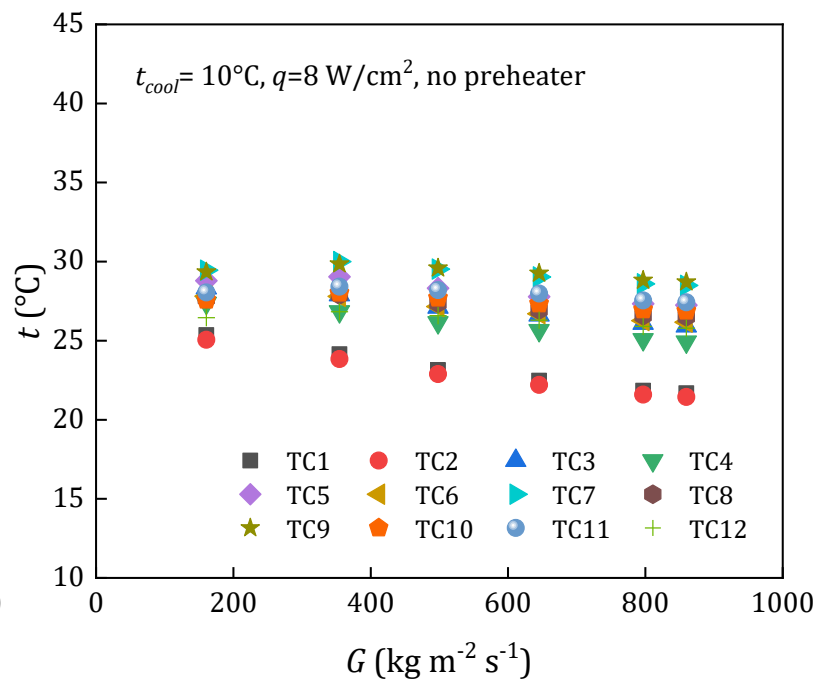
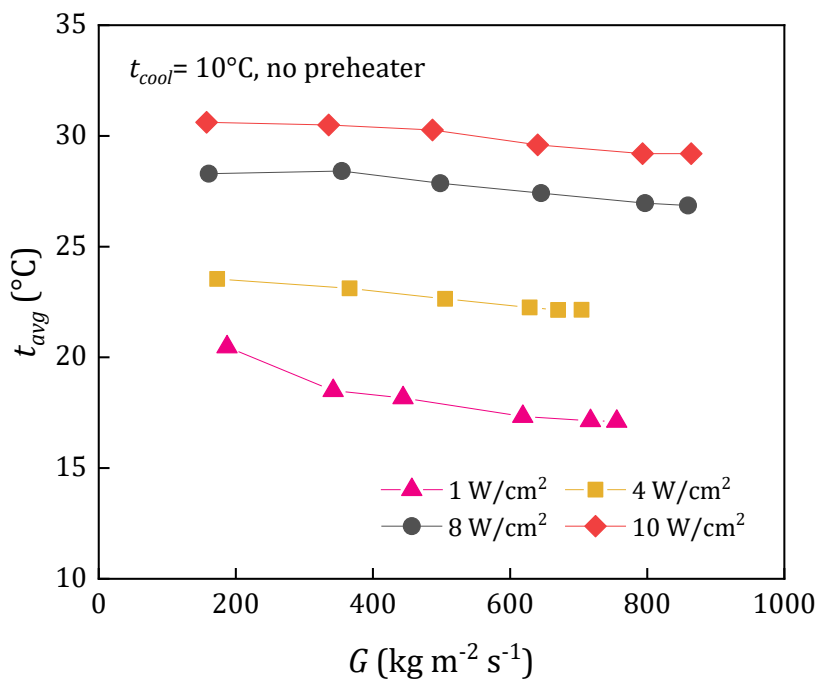
## □ 案例一：泵驱两相热管理系统设计及验证



□ 以低压制冷剂R1233zd(E)为工质，完成系统设计

□ 单相液冷（50%乙二醇溶液）与泵驱两相的性能对比

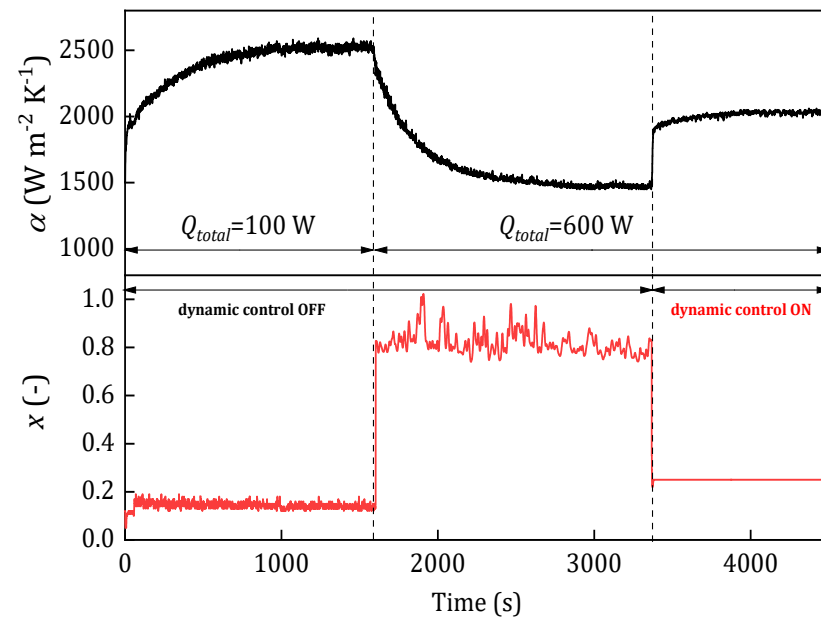
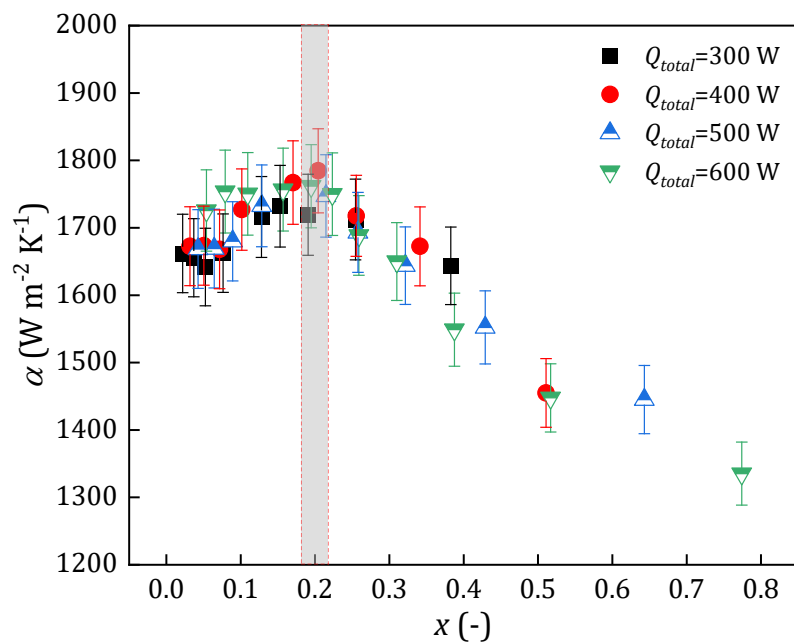
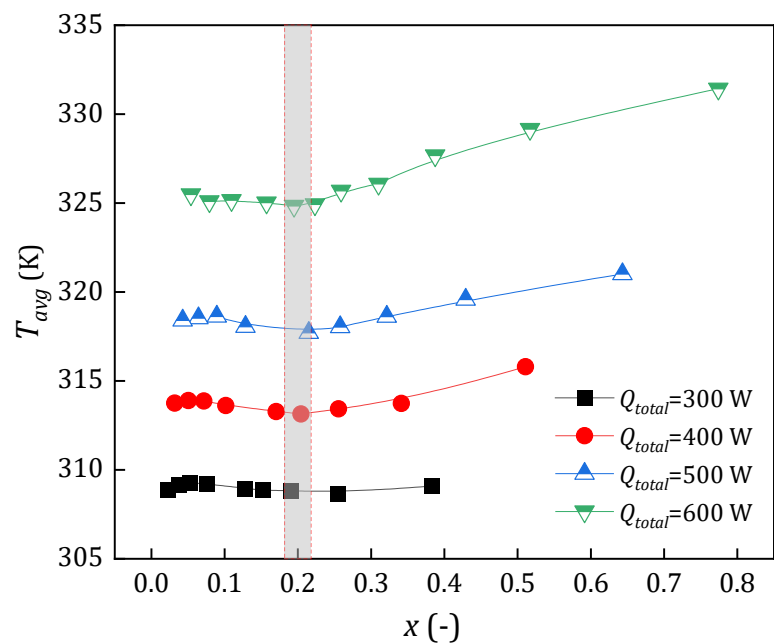
## 案例一：泵驱两相热管理系统设计及验证



两相散热时，液冷板表面最大温差可控制在 $5^\circ\text{C}$ 以内

两相换热系数随热流密度升高明显增加 → 更适合于高热流密度工况

## 案例一：泵驱两相热管理系统设计及验证

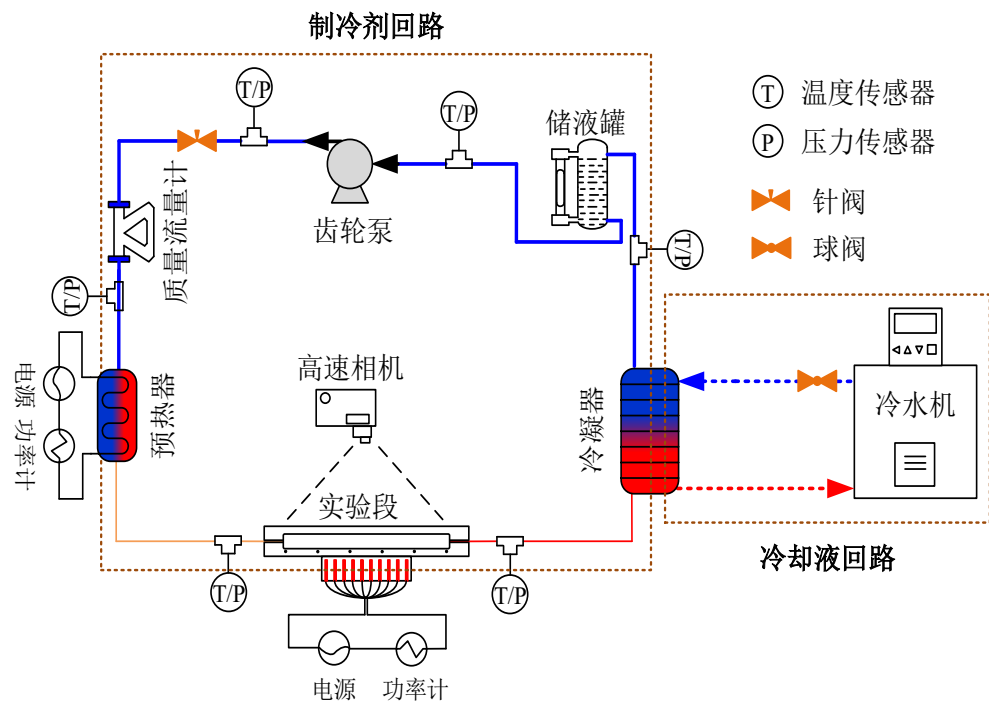


针对系统瞬态热负荷波动，提出了以**最优出口干度为目标**的控制策略

根据模糊逻辑结合FPGA程序设计，完成控制策略实验验证



## 案例二：两相换热部件内部**流动可视化**研究



浙江银轮实验室，浙江台州

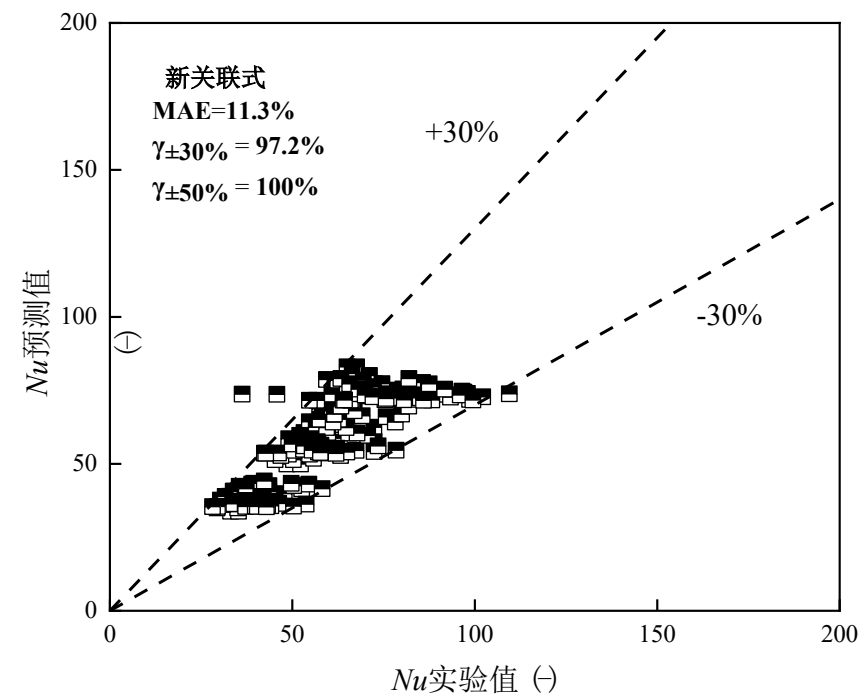
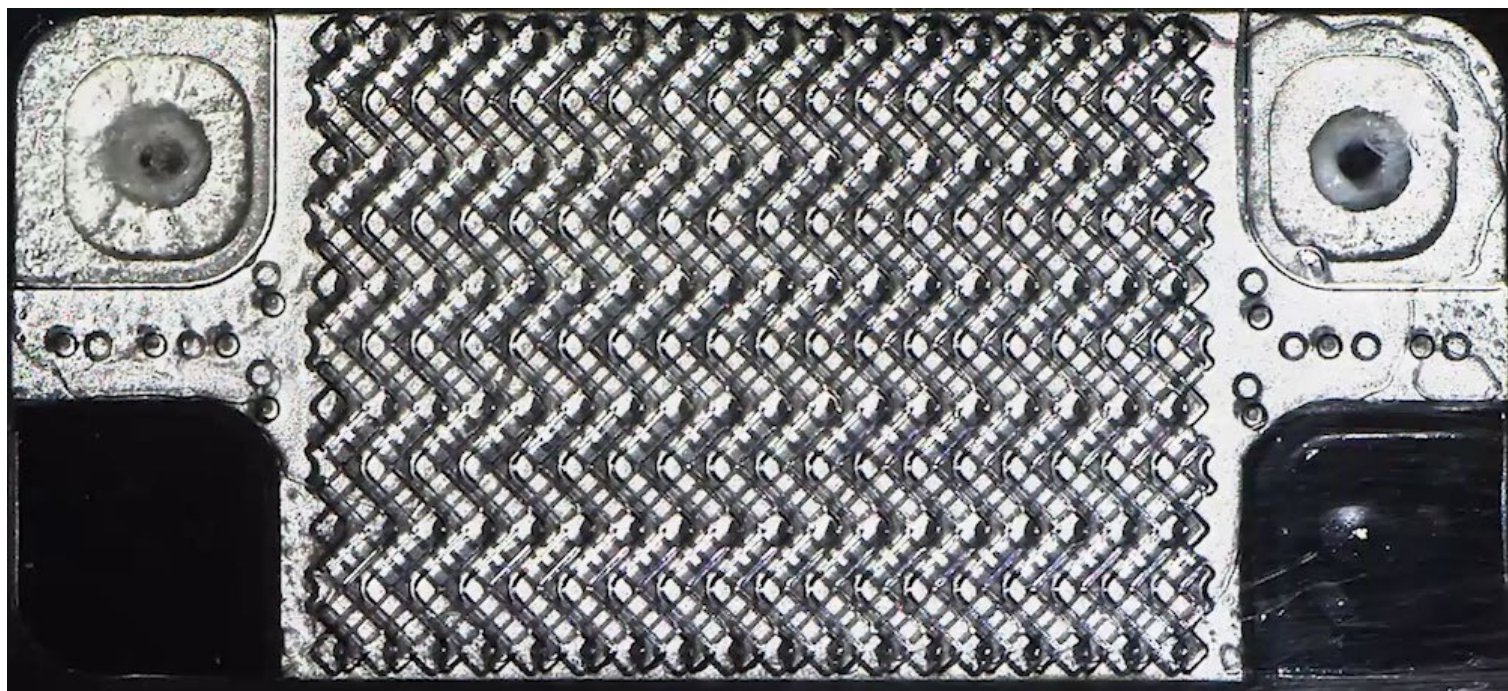


上海理工大学实验室，上海杨浦

根据换热部件典型结构，定制设计可视化实验段

可同时实现换热性能测试及两相流型观测，**为换热部件优化提供更多维度参考**

## □ 案例二：两相换热部件内部**流动可视化**研究



## □ 波纹板片换热器内部的两相流型分析

□ 根据可视化结果，对经验关联式进行修正，**预测误差下降至11.3%**



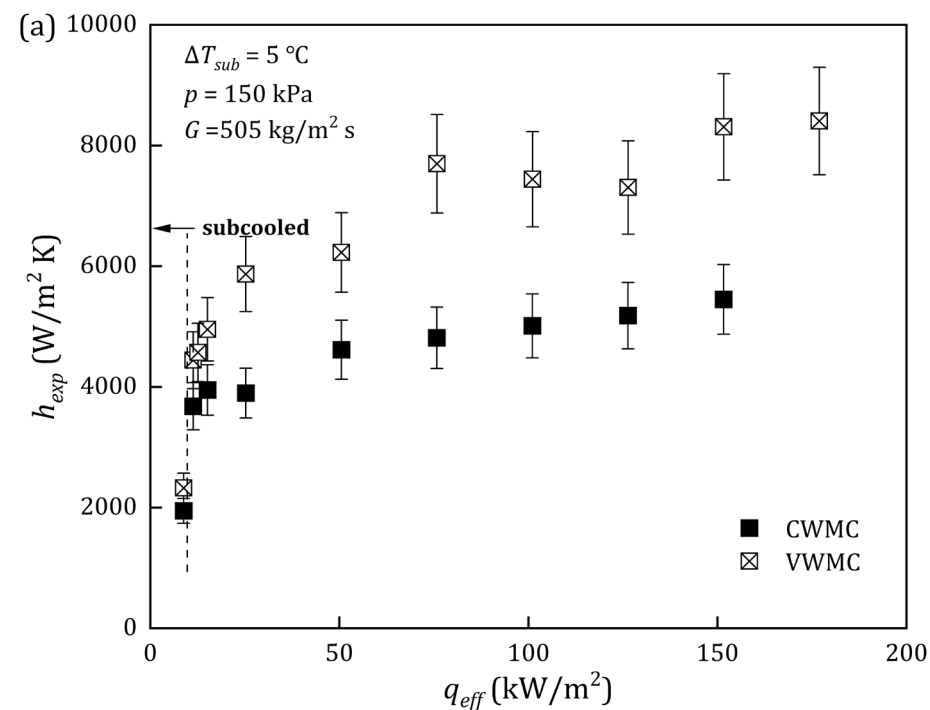
## □ 案例二：两相换热部件内部**流动可视化**研究

### Supplementary Movie

Title: Experimental investigation on flow boiling heat transfer of R123zd(E) in parallel microchannel heat sink with variable channel widths

### Flow pattern transition

- $\Delta T_{sub} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $G = 2020\text{ kg/m}^2\text{ s}$

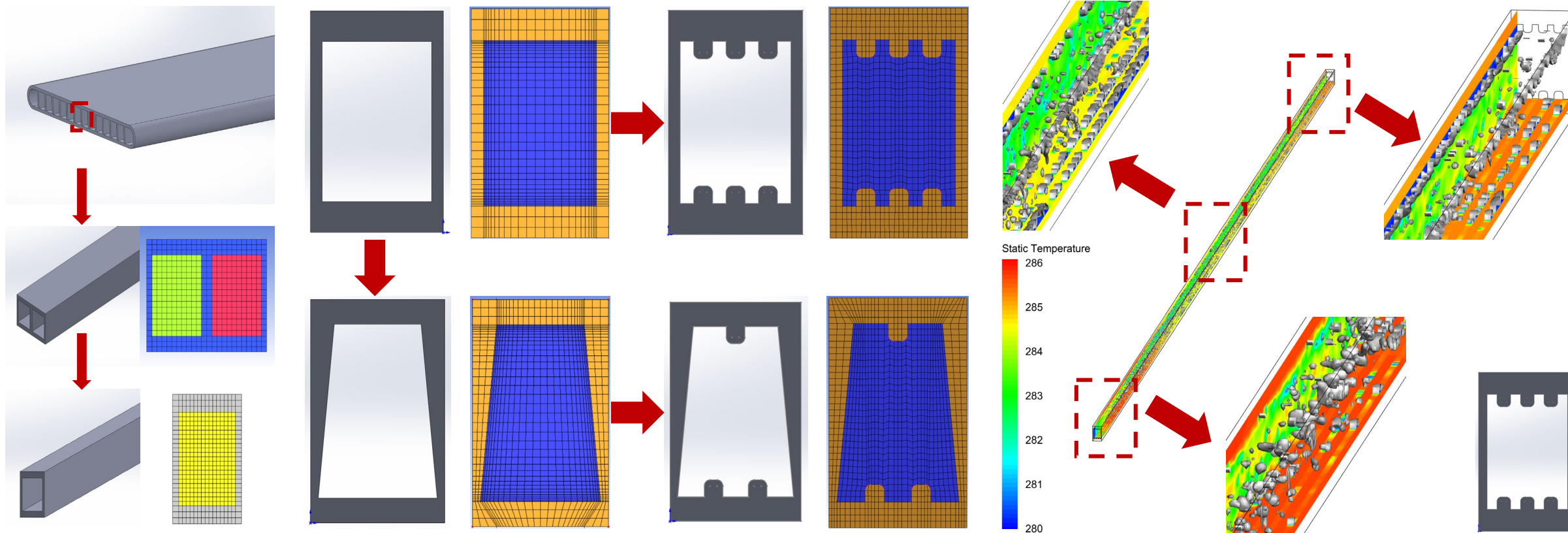


## □ 并联微通道的流型演变及对应换热特性分析

## □ 后期可对不同结构（流线型通道、仿生学结构等）进行**拓展性研究**

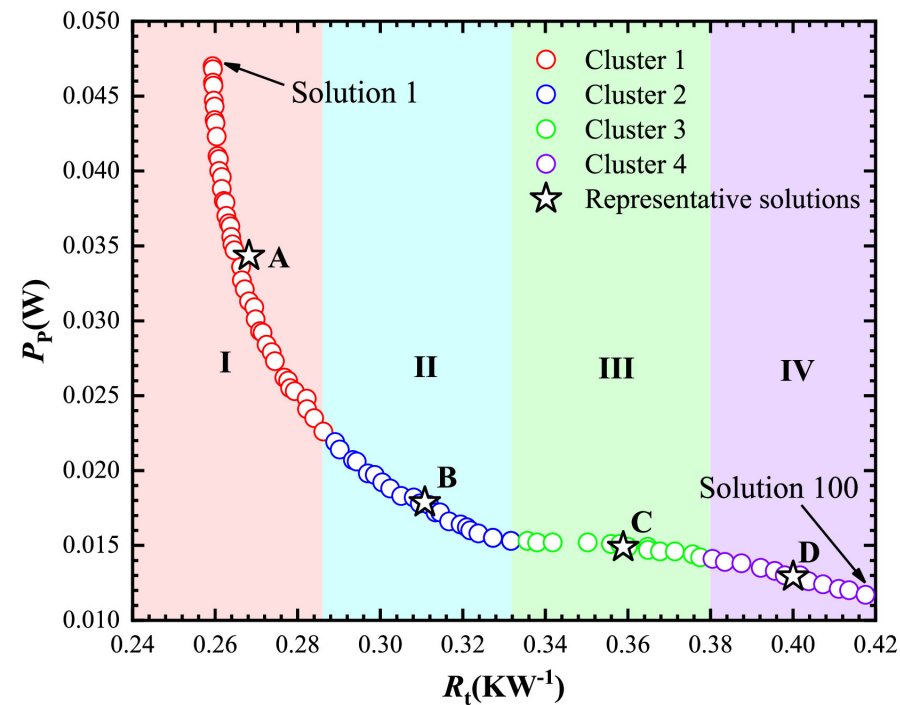
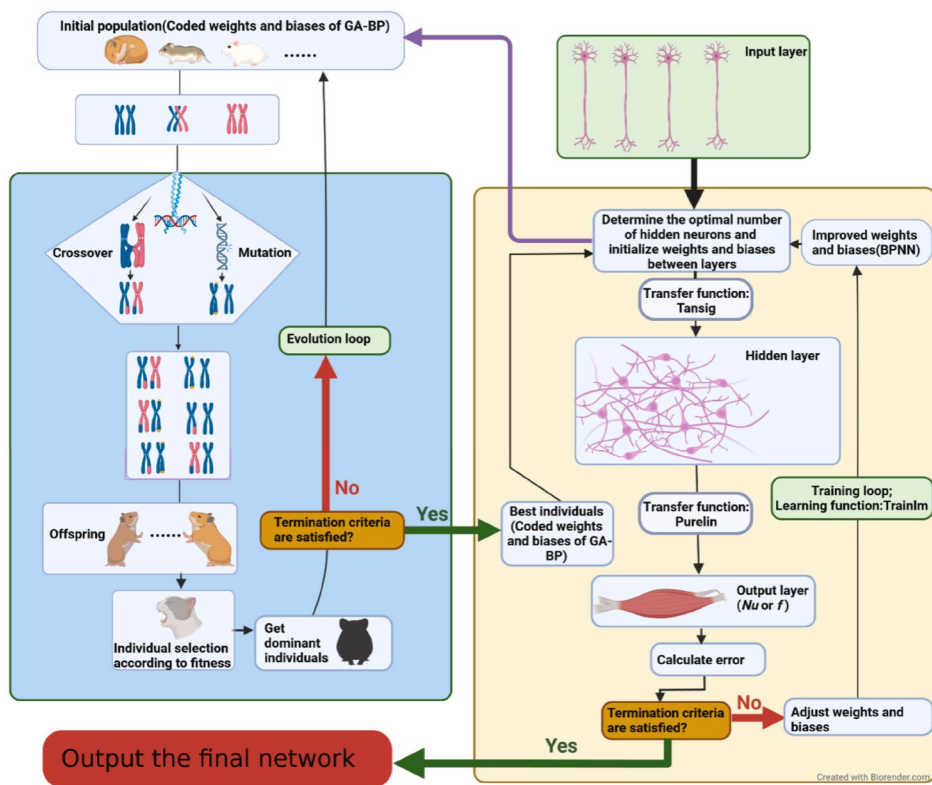
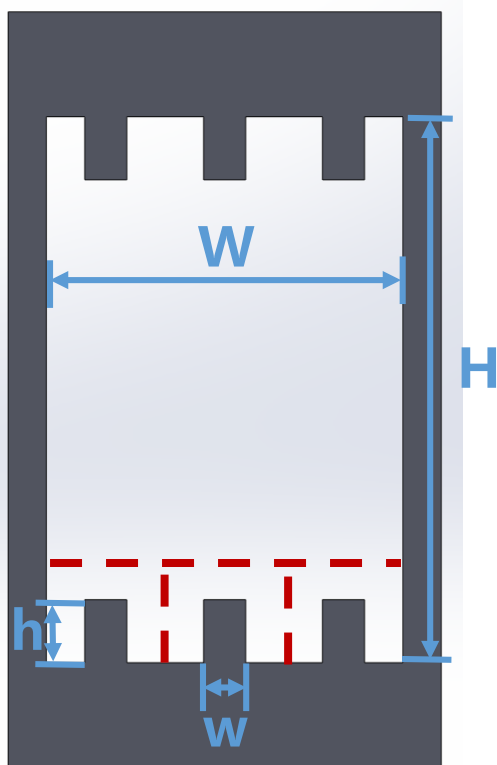


## 案例三：热管理系统零部件自动寻优



## 基于CFD软件分析不同微通道换热器管型的换热特性

## 案例三：热管理系统零部件自动寻优



基于遗传算法及人工神经网络，结合帕累托前沿完成管型自动寻优





## □ 人员组成

- ✓ 教授1人、副教授2人、讲师1人
- ✓ 博士/硕士研究生10~15人

## □ 主要合作伙伴

**Honeywell**

**PURDUE**  
UNIVERSITY



**银轮股份**  
YINLUN CO.,LTD





# 2024 (第三届) 全球液冷系统创新开发与应用技术大会



**感谢关注， 欢迎合作交流！**

**E-mail: [yidongfang@usst.edu.cn](mailto:yidongfang@usst.edu.cn)**

**电话: 133 8177 2908**

