# 高效低碳空调与供热的基础理论和关键技术

李先庭
清华大学 建筑学院 建筑技术科学系
2025/5/22

# 目录


1 背景

2 空调负荷数量与品位

3 分级空气处理装置

4 与嵌管围护结构相结合的空调系统

5 水氟互联空调系统

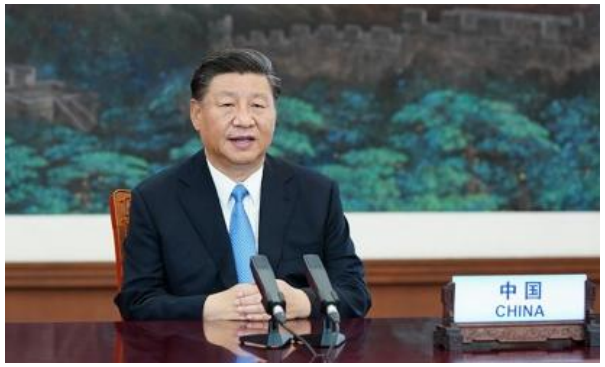
6 总结

# 全球气候变化对我国低碳发展提出的要求

## □ 全球温升控制目标

- 《巴黎协定》：将全球温升控制在不超过工业化前水平2°C以内，并力争达到1.5°C
- 《格拉斯哥气候公约》：将全球温升控制在1.5°C以内、实现世界免遭灾难性气候变化

## □ “双碳”目标




- 中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施
- 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取于**2060年前实现碳中和**

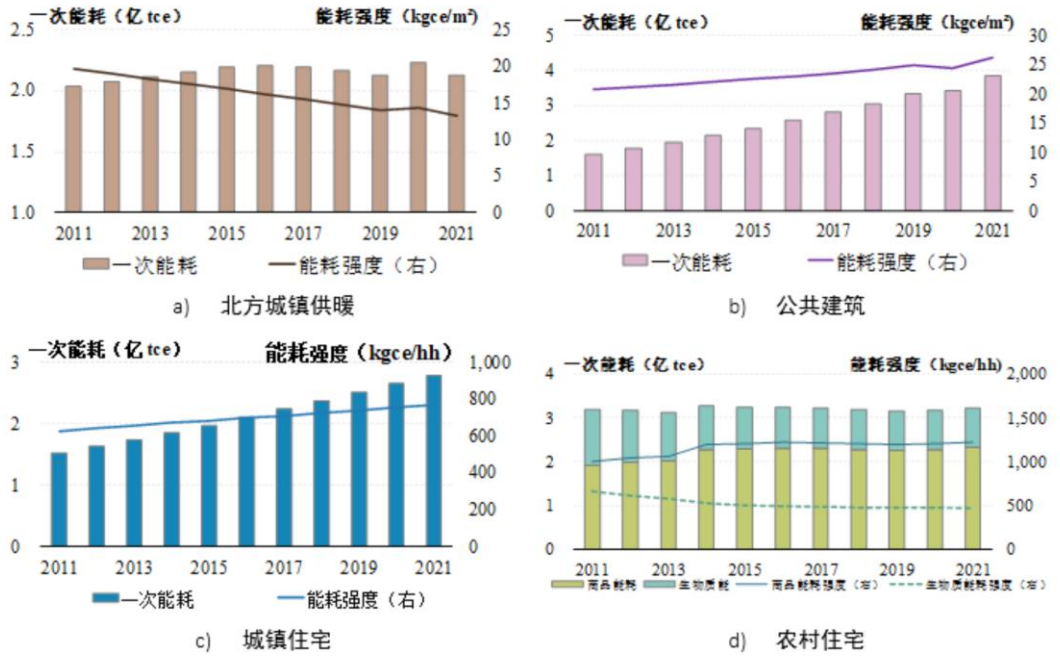
——习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话 新华网

## □ 建筑能耗在全球能耗中占三分之一，我国占23%

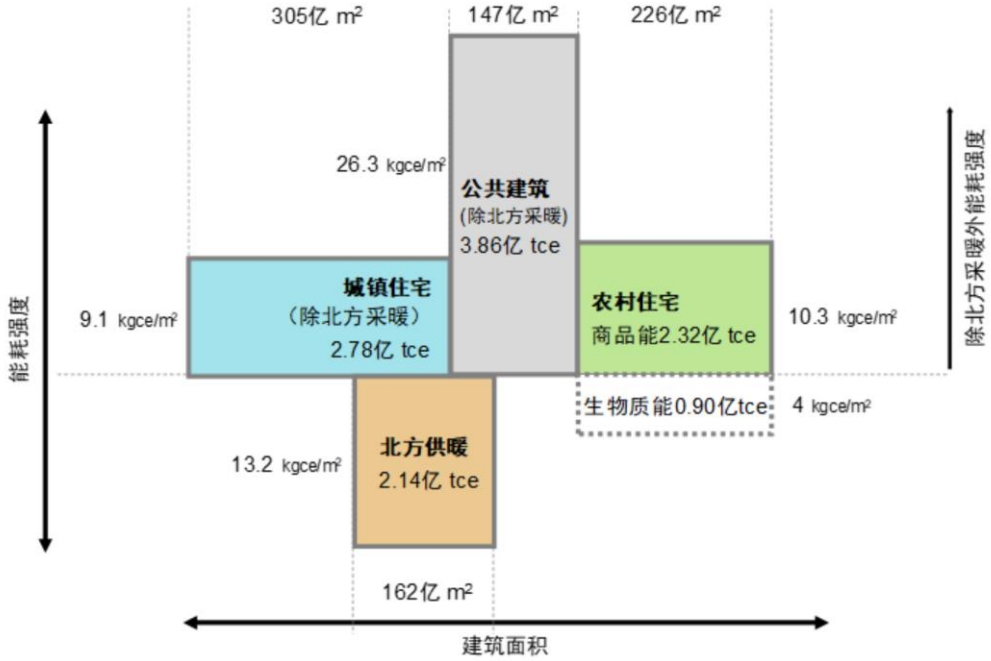
**为了实现双碳目标，建筑节能越来越受到重视！**

# 供热和空调领域的能耗和碳排放

- 我国建筑能耗增速快，其中供热和空调系统能耗占比大，导致大量碳排放量
- 随着人们对舒适性要求的提高，供热和空调系统能耗及碳排放将进一步增长




**建筑用能各分项总量和强度逐年变化（2010年~2020年）**



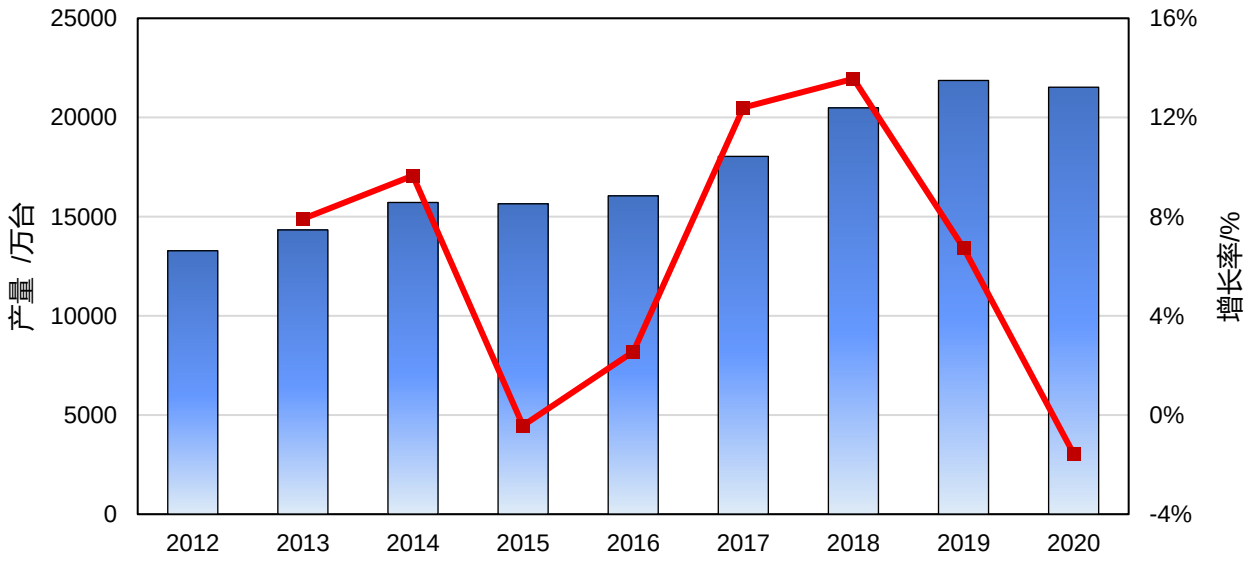

**中国建筑运行能耗（2021年）**

**供热和空调行业节能减排工作仍任重道远**

数据来源: 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.

# 供热和空调对舒适与民生保障至关重要

- 利用供暖空调等设备营造人工环境以保证室内的热舒适，是人民日益增长的美好生活需要
- 随着我国现代化水平不断提高，人们对居住和生产环境的要求越来越高，应用供热和空调设备的场景越来越多样化，导致的能耗越来越多
- 如采用的供热空调方式不合适，会导致我国能耗的大幅增加

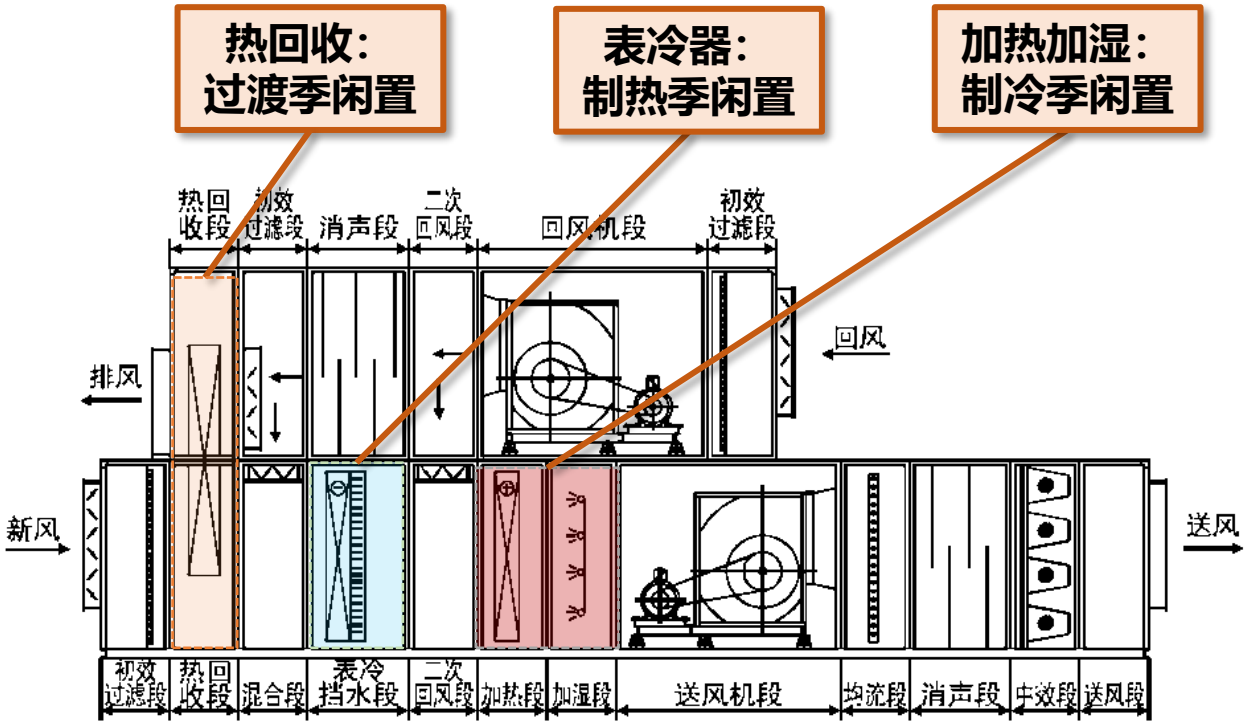



中国统计年鉴

# 现有技术及不足1：空气处理流程未适应工况变化调节



- 空气处理流程中大量闲置设备，形成空气输配阻力

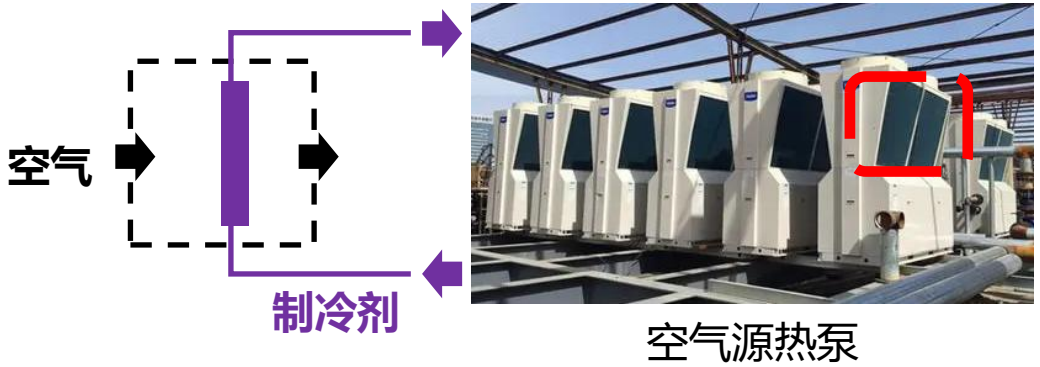



某空调箱结构

- **加热盘管、加湿器：**在夏季闲置
- **冷却盘管：**在冬季闲置
- **热回收装置：**在新风与排风焓差较小时浪费风机能耗，削弱新风通风冷却潜力
- **过滤装置：**当空气质量良好时，消耗风机能耗

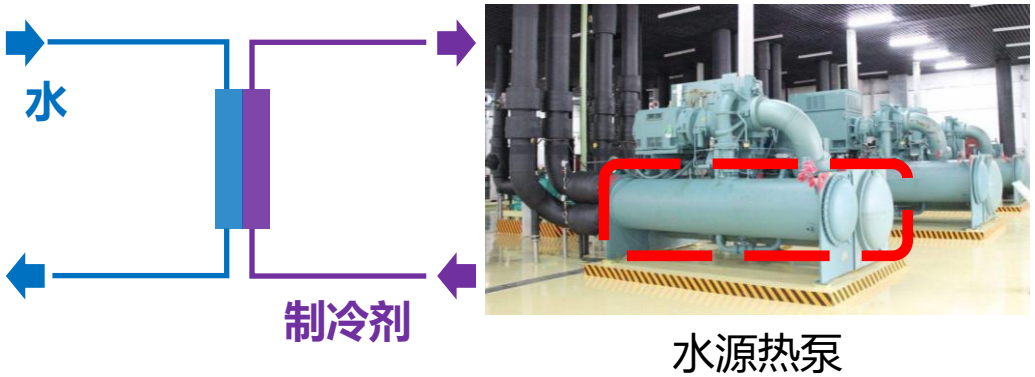
# 现有技术及不足2：冷热源为单一源/汇或仅产风/水

## □源侧：空气源/水源




空气源热泵

空气源热泵：兼顾制冷和制热；制冷效率低，制热需除霜




水源热泵

水源热泵：制冷效率高；制热受限、消耗水源

## □末端：送风/辐射末端

送风末端

散流器

风机盘管

热风机

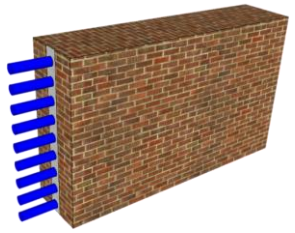
……

送风末端：快速响应；但是所需能源品位高，易有吹风感

辐射末端

辐射供冷

地板采暖



嵌管式墙体

……

辐射末端：噪音低，热舒适性好，更节能；但响应速度慢

**现有末端产风、产水泾渭分明，空气源和水源也泾渭分明，却均存在各自的不足，无法利用两种末端或两种源的优势**

# 现有技术及不足3：单一品位冷热源难以大幅提升能效

清華大學 Tsinghua University

**热泵理想极限效率：**

$$COP_{max} = \frac{Q_o}{Q_k - Q_o} = \frac{T_o}{T_K - T_o}$$

热力学第二定律约束

**热力学完善度：**

$$\eta = \frac{COP_{real}}{COP_{max}}$$

**冷水机组** $\eta \approx 0.309\sim0.5$

**地源热泵** $\eta \approx 0.3\sim0.5$

**风冷热泵** $\eta \approx 0.25\sim0.33$

热泵机组制备低温冷冻水7℃/高温热水45℃时，效率受制于热汇/源，进一步提升空间有限

**高温热水和低温冷水方式很难进一步提高效率**

# 目录


1 背景

2 空调负荷数量与品位

3 分级空气处理装置

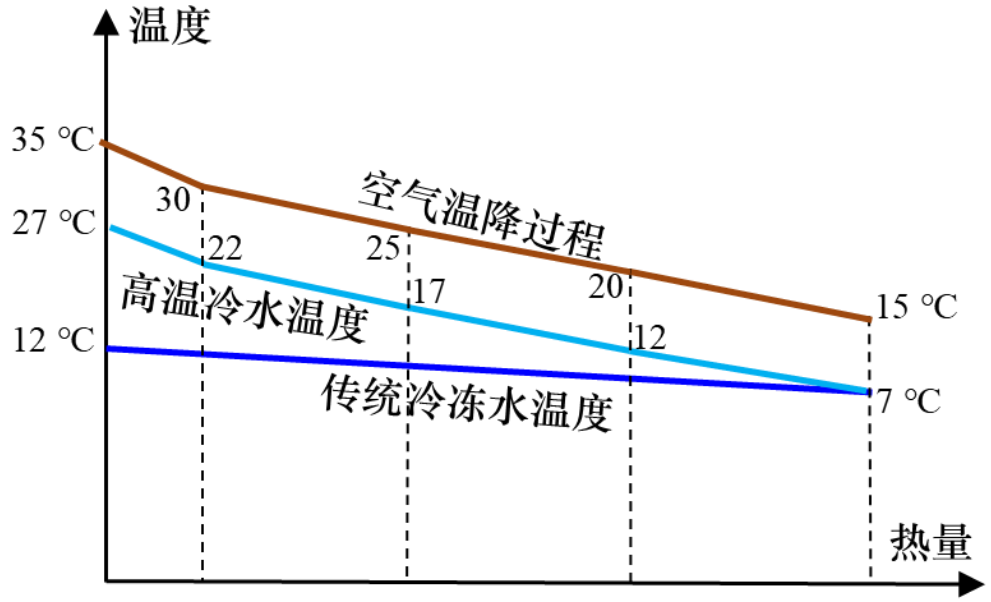
4 与嵌管围护结构相结合的空调系统

5 水氟互联空调系统

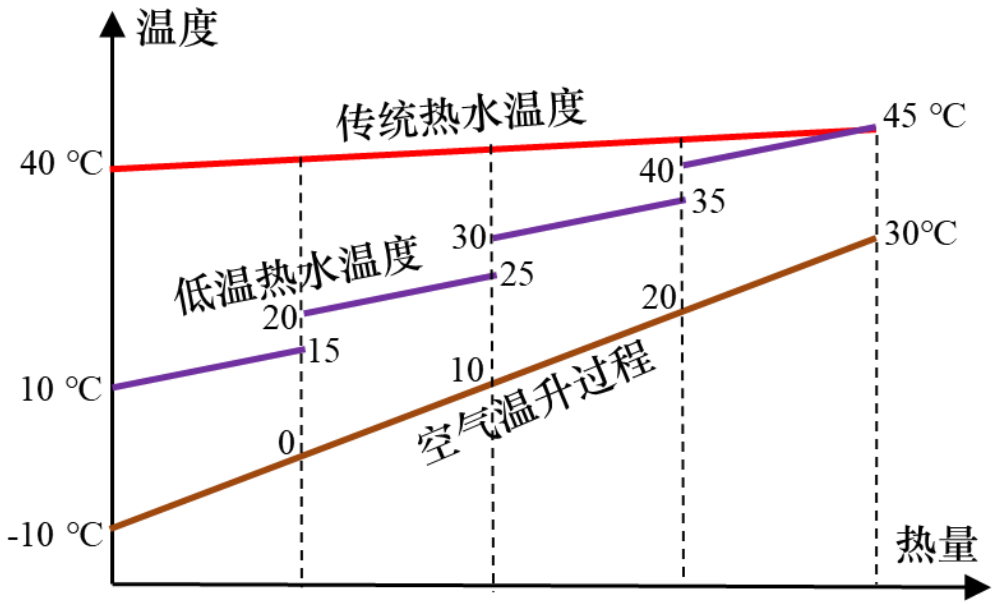
6 总结

# 传统空气处理过程

- 由于采用单一高品位冷热源处理空气，换热器各部分换热温差不均匀，换热器两端空气-水换热温差差异较大
- 将夏冬季空气处理过程进行分级，使各级均在合理温差下换热，可以采用更高温的冷水或更低温的热水处理负荷

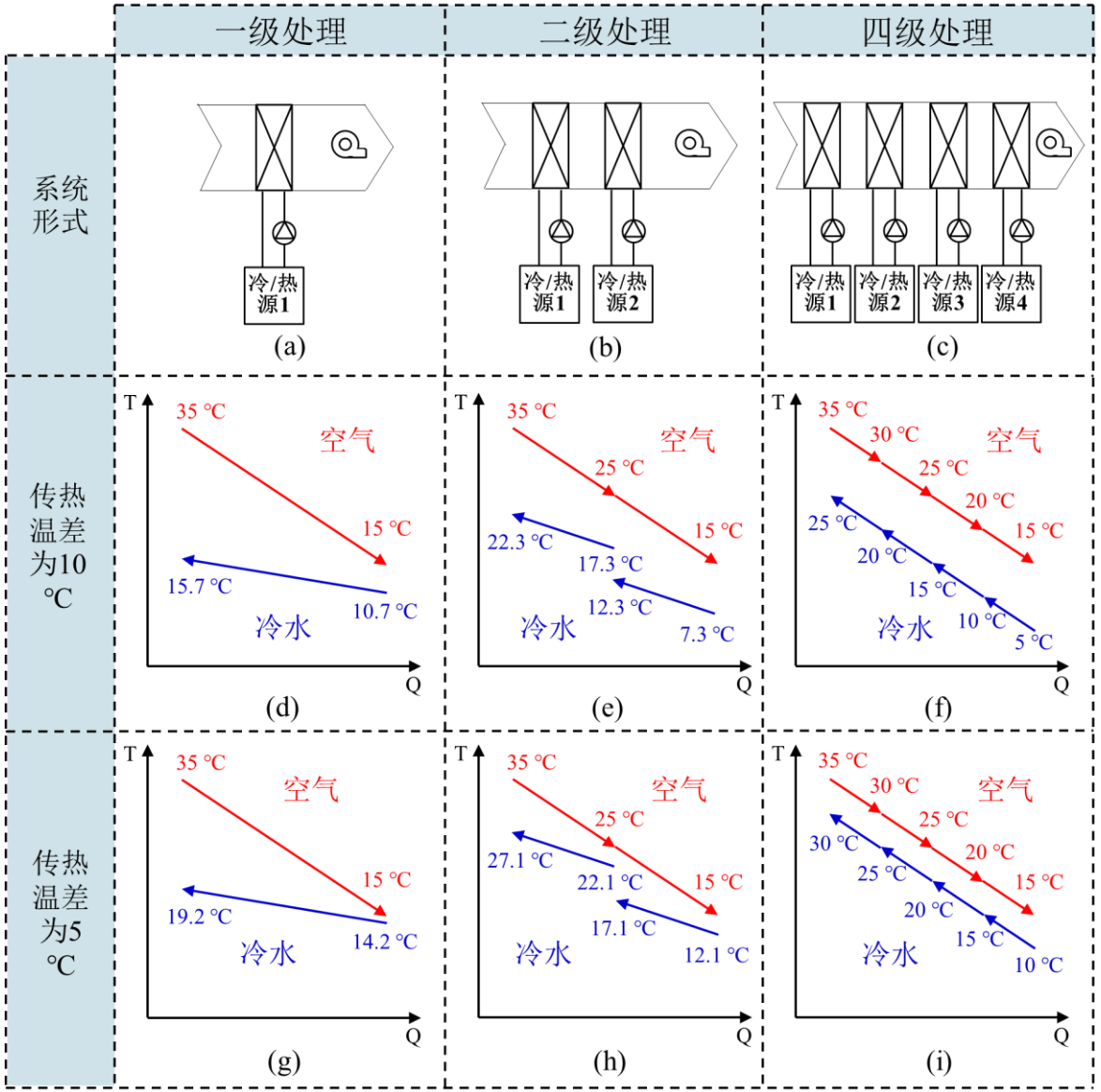



空气冷却降温过程




空气加热升温过程

# 合理的分级温差与传热温差




## □传热温差的影响

传热温差减小

- 冷冻水温度升高
  热泵能效提高
  热泵能耗降低 — 正面
- 传热面积增加
  风阻水阻增加
  风机水泵能耗增加 — 负面

## □分级温差的影响

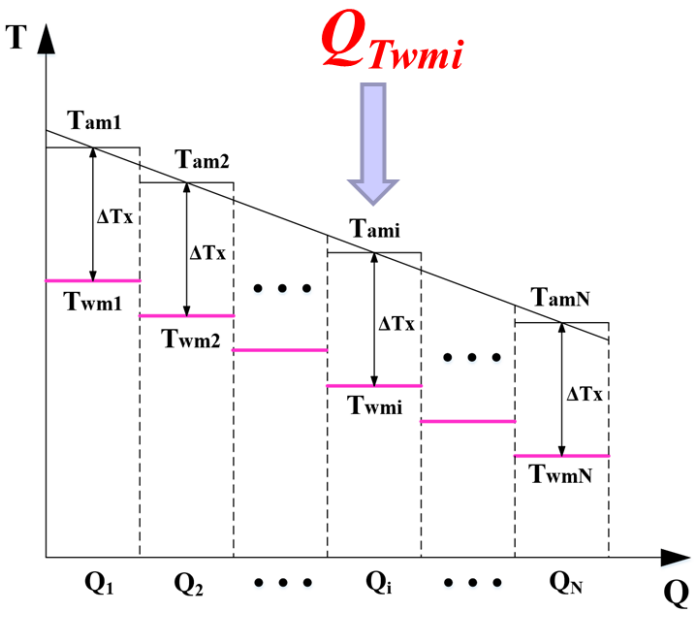
分级温差增大

- 终处理级的供应品位降低 — 正面
- 预处理级的供应品位升高 — 负面

**合理的分级温差和传热温差能使冷热源和输配能耗最小**

# 负荷品位定义及负荷数量和品位表达方法

## □ 负荷品位的定义




空气多级处理过程

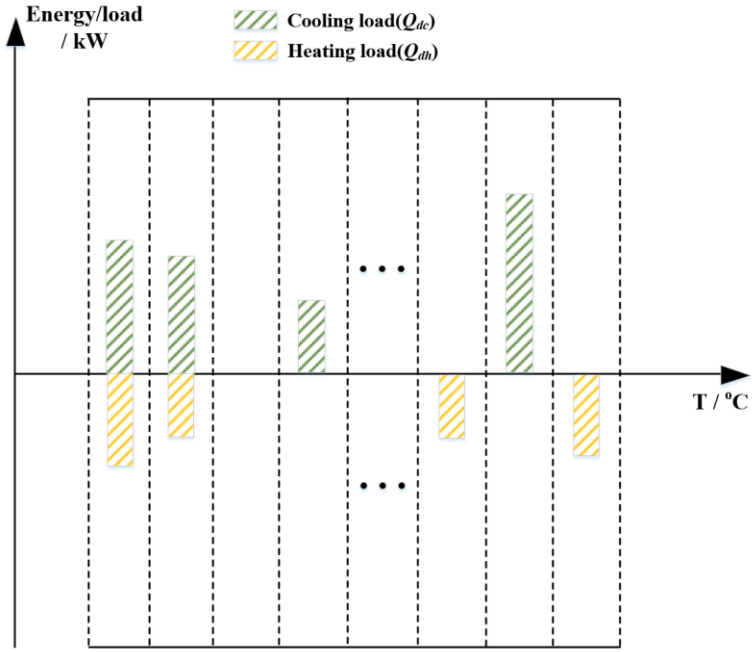
辐射冷板

地板辐射末端

辐射类末端

- **空气处理过程：**用级差和温差均合适时处理负荷的介质温度表征所处理负荷的品位
- **辐射类末端：**用其平均水温表征其所处理负荷的品位

## □ 负荷数量和品位表达方法

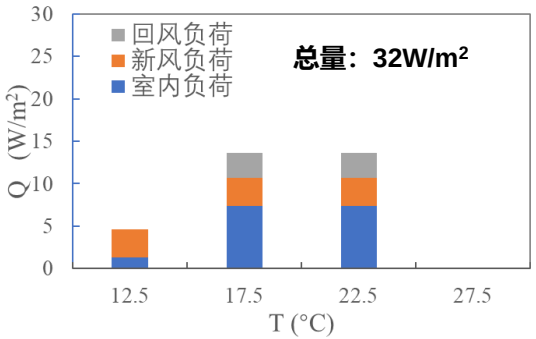



负荷数量与品位分布图

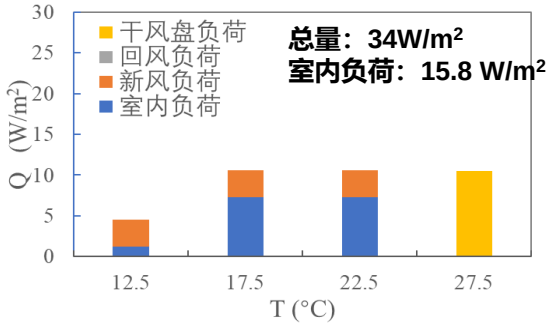
- 横坐标上部为放热区，下部为吸热区
- 横坐标代表负荷品位，纵坐标代表负荷在相应品位下的数量
- 散热量为正值，吸热量为负值

# 负荷数量变化与品位迁移

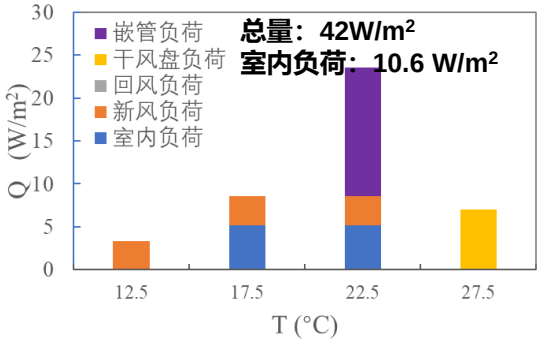
- 尽可能将高品位负荷转移至低品位，尤其是自然能源能直接处理的品位，且使机械制取的品位尽量与负荷品位匹配，以提高热泵效率。



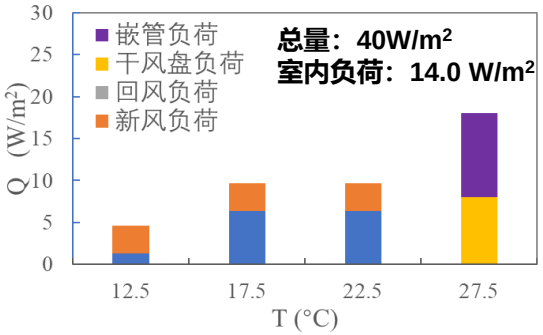

单一送风末端




顶部干风盘（水温27.5°C）

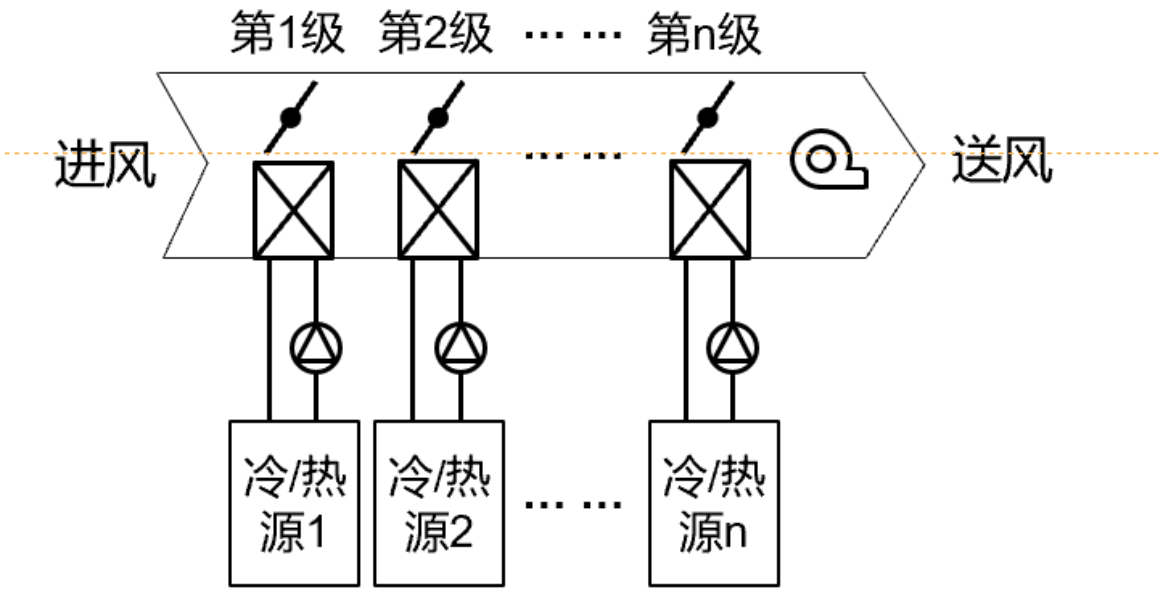



送风末端+顶部干风盘
+嵌管围护结构（水温22.5°C）




送风末端+顶部干风盘
+嵌管围护结构（水温27.5°C）

- 空气处理装置全年不同工况的换热面积和冷热源温度合理，从而减少热泵、风机和水泵功耗，以显著提高空气处理装置效率。




**理想空气处理系统**

# 目录


1 背景

2 空调负荷数量与品位

3 分级空气处理装置

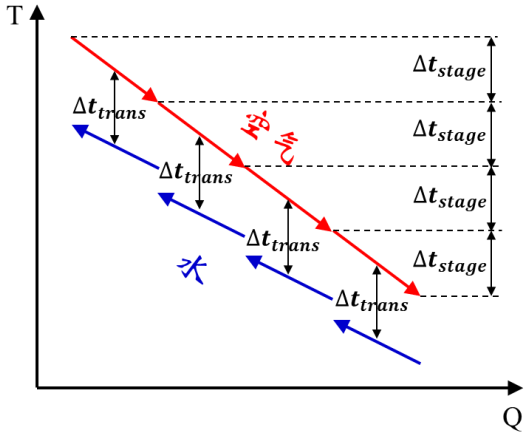
4 与嵌管围护结构相结合的空调系统

5 水氟互联空调系统

6 总结

# 3.1 多温水处理系统

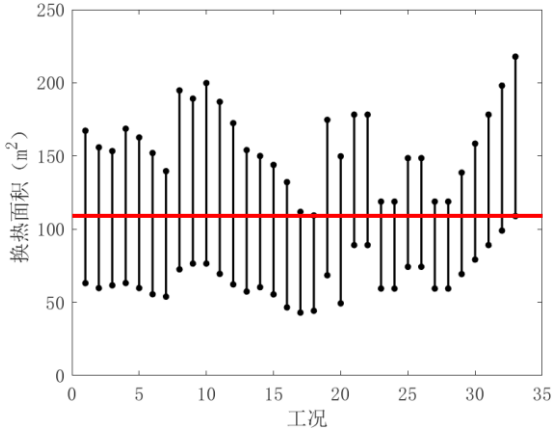
## □ 空气处理过程分级温差与传热温差的范围



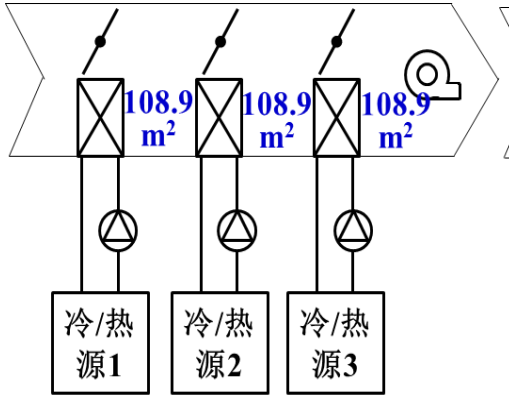

| | 工况 | 夏季 | 冬季 |
|---|---|---|---|
| 新风 | 分级温差(℃) | 3~8 | 5~11 |
| | 传热温差(℃) | 2~5 | 3~6 |
| 循环风 | 分级温差(℃) | 2~5 | 2~7 |
| | 传热温差(℃) | 2~6 | 2~6 |

在绝大多数地区，新风机组与循环风机组可分别设置为3级和2级

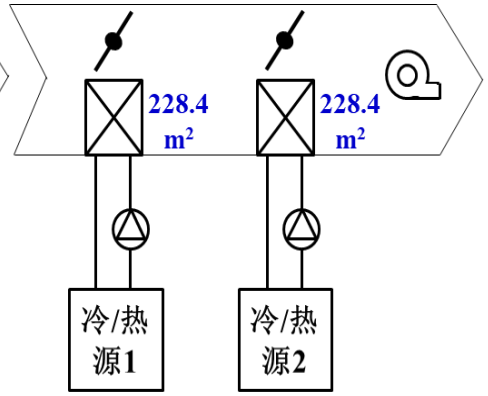
## □ 不同工况所需换热面积的交集




每级换热面积



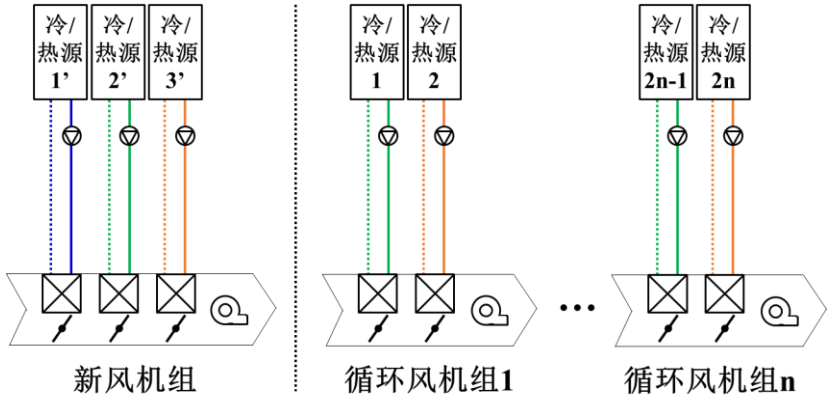

新风机组设计容量




循环风机组设计容量

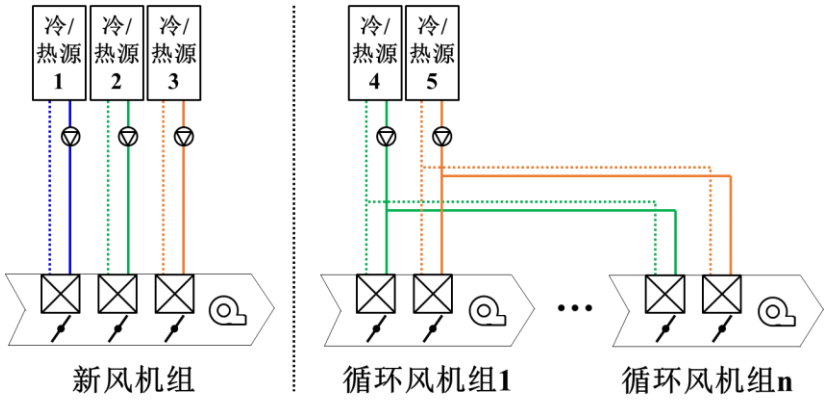
相比于传统系统，北京地区新风与循环风的多级处理系统年平均节能率分别为29.6%和16.1%

# 三温水系统



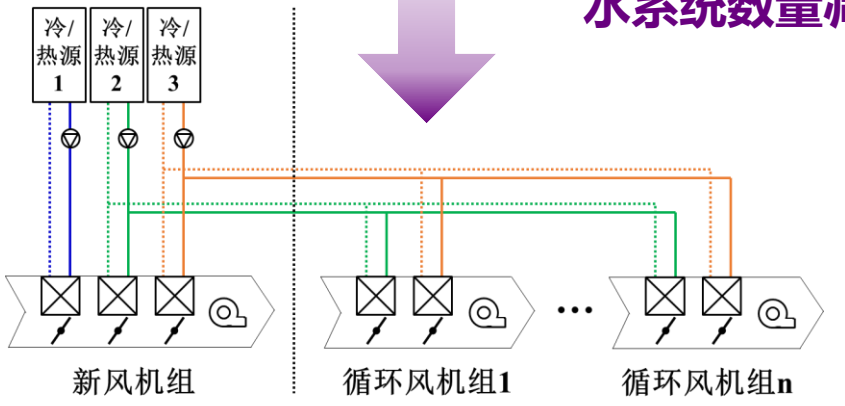

**理想系统**
**(n种水温)**

水系统数量减少




**循环风末端共用水系统**
**(5种水温)**

水系统数量减少

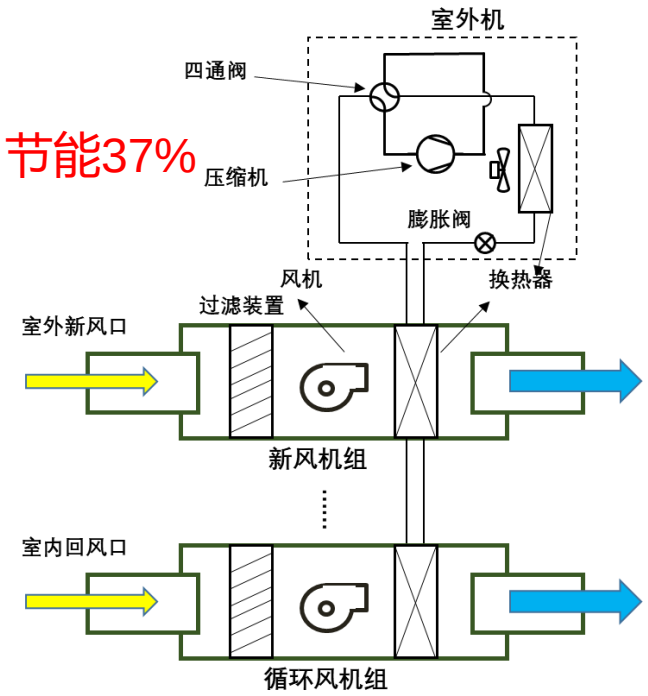



**循环风与新风末端共用水系统**
**(3种水温)**

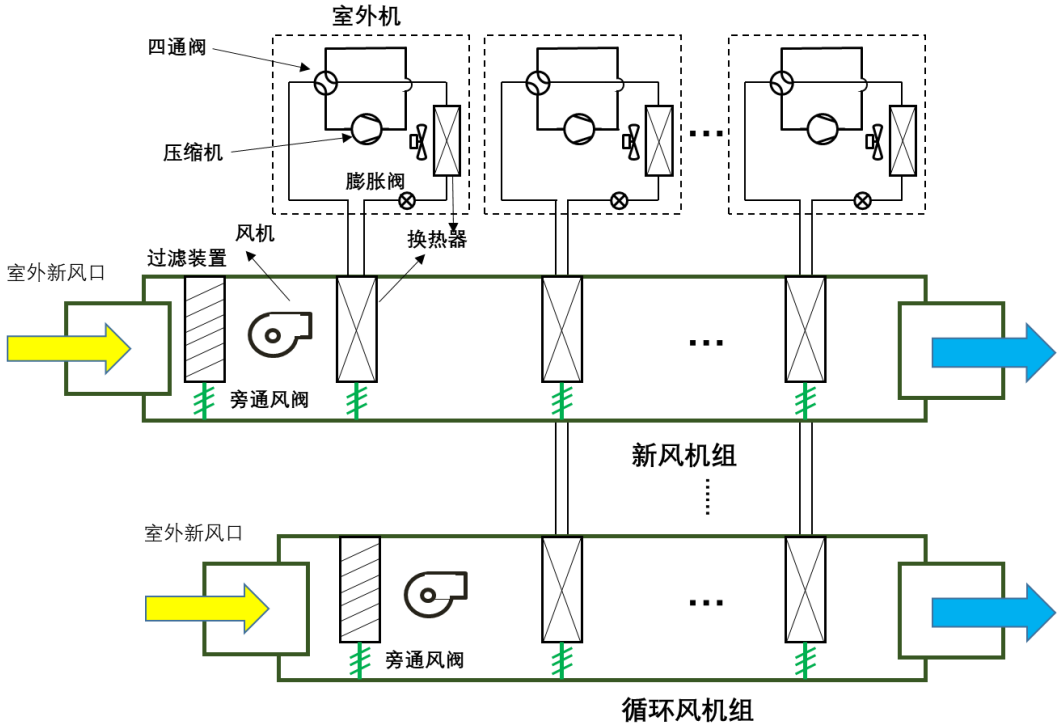
- 理想系统能效高，但水系统数量过多
- 与理想系统相比，三温水系统的能耗增加率为2.2%，并不显著，因此循环风与新风末端可以共用水系统，形成三温水系统形式
- 三温水系统是一种接近于理想系统的可实现形式

# 3.2 直膨式空气分级处理系统

- **现有技术：**市场产品主要是对空气进行单级直膨式处理，在变工况运行时能效较低
- **新型方案：**采用多级盘管对空气进行分级处理，并在每级盘管旁设置旁通风阀，当部分盘管工作时，将闲置盘管旁通，从而实现冷热源系统及输配系统的高效
- **应用场景：**办公建筑、工业建筑、地铁等，分体或多联式、集中或分散式




传统单级系统

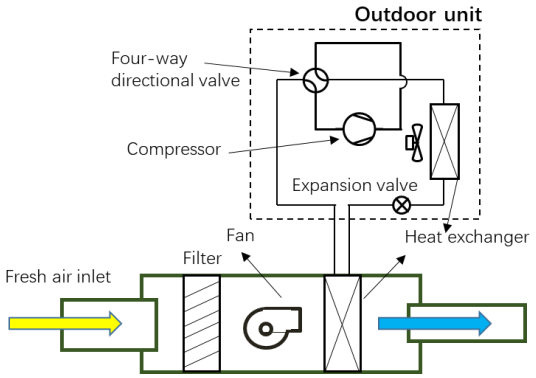



空气分级处理系统

# 直膨式空气分级处理系统的应用效果

- 以直膨式新风三级处理系统为例，新风由多级盘管处理，当部分盘管工作时，闲置盘管风阀打开，对应机组停机，实现系统在部分负荷下的性能提升
- 在北京、南京、广州应用时全年节能率为23.6%、25.5%、24.1%

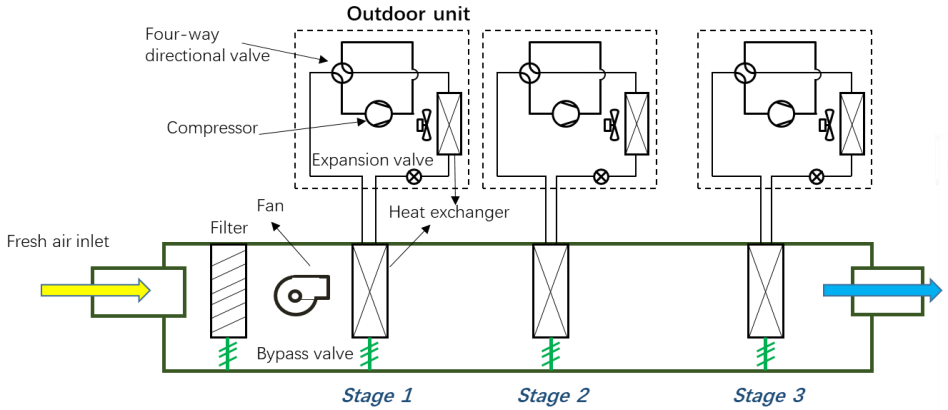
外机：20 hp




换热器面积：3A

新风单级处理系统

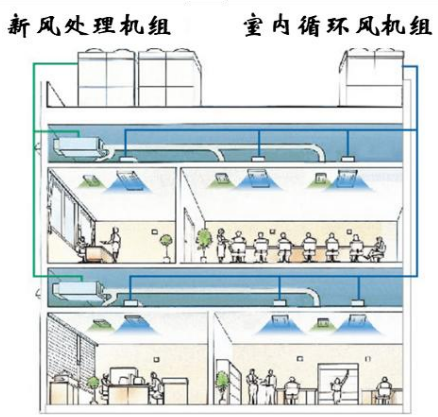
外机：7 hp　7 hp　7 hp



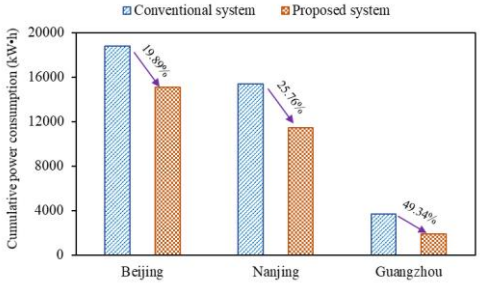

换热器面积：A　A　A

新风多级处理系统

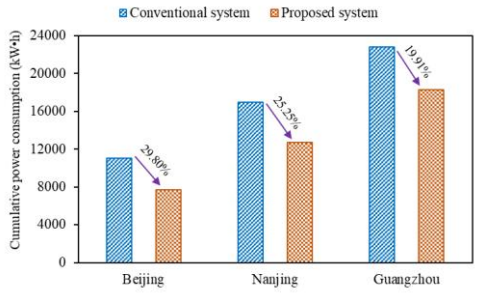
办公建筑
空调作息：8:00-18:00
风量：5000m³/h




典型建筑形式



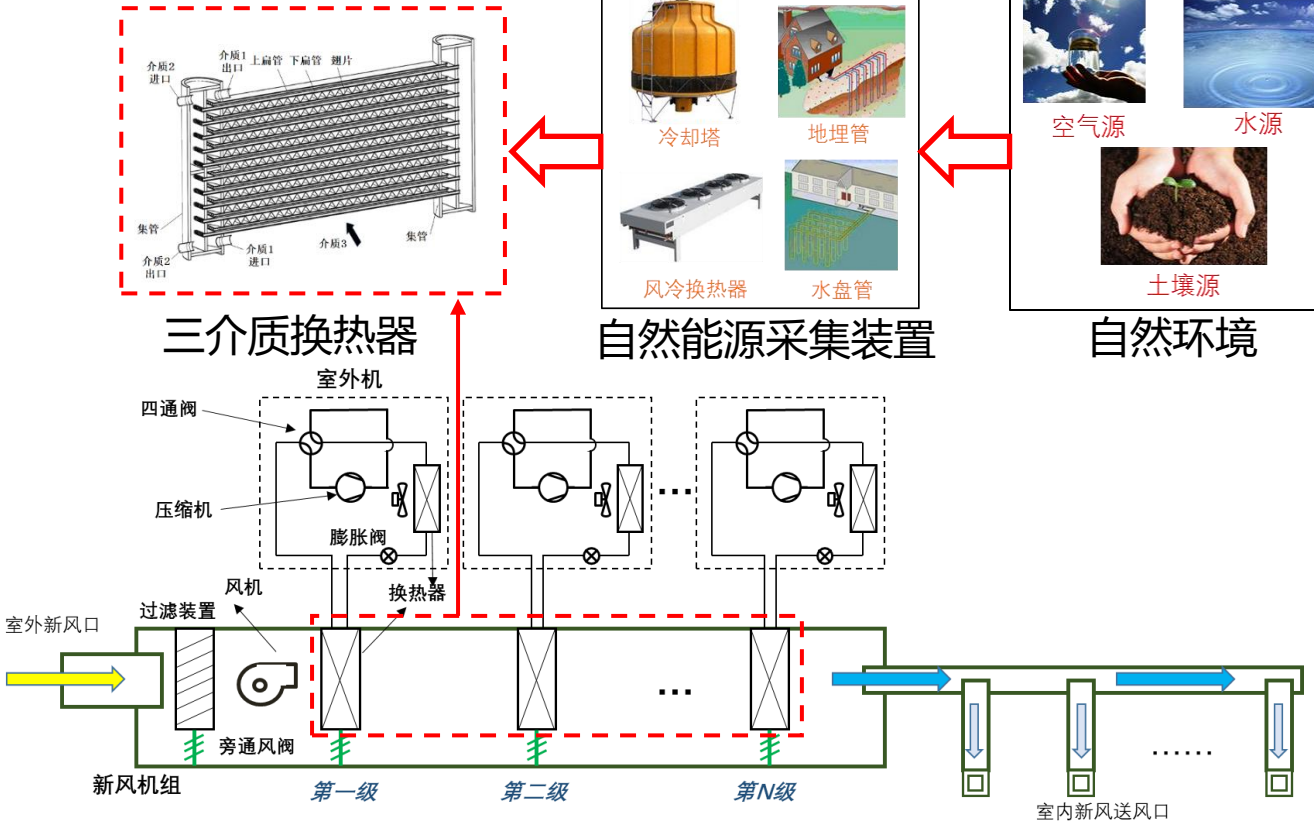

制热季节能效果

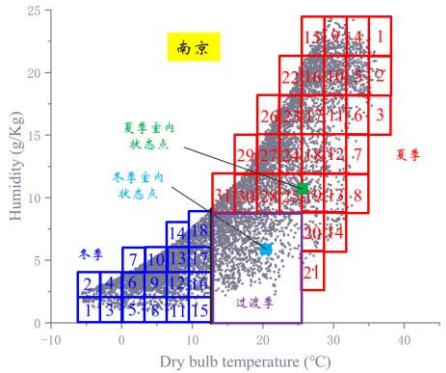



制冷季节能效果

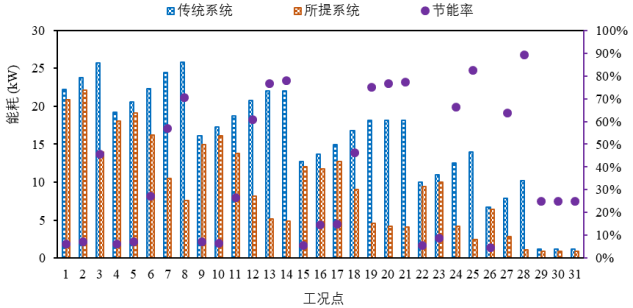
# 结合三介质换热器的直膨式空气分级处理系统

- **现有技术：**现有的直膨式空气处理机组无法利用自然能源，性能提升受到限制
- **新型方案：**将多级新风系统盘管替换为三介质换热器，兼顾直膨处理空气和自然能源利用
- **应用效果：**以南京办公建筑为例，新型系统较相同换热面积和容量的单级系统节能37%




运行工况




典型工况性能计算

# 目录


1 背景

2 空调负荷数量与品位

3 分级空气处理装置

4 与嵌管围护结构相结合的空调系统

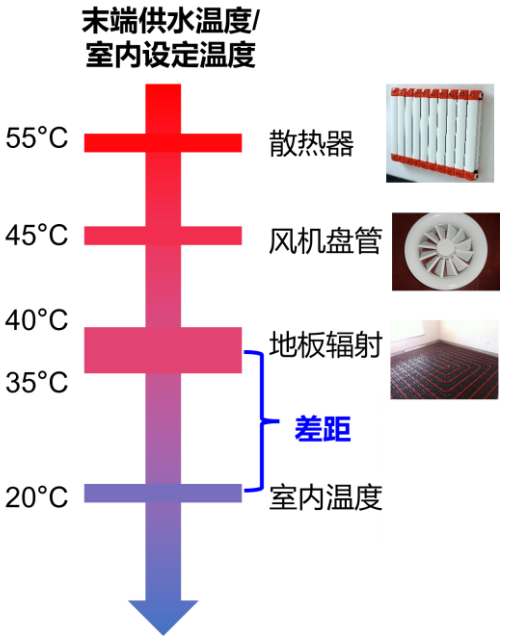
5 水氟互联空调系统

6 总结

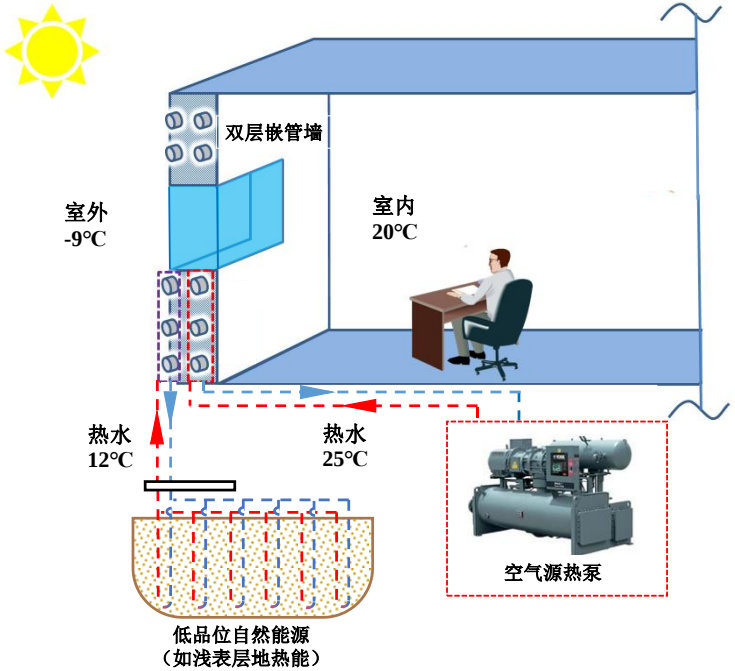
# 结合嵌管围护结构的空气源热泵系统

## □ 适应连续运行的新型热泵供热系统

- **背景：**热泵逐渐取代锅炉；现有供热系统的热水温度显著高于室温，限制了热泵效率提高；且未利用自然能源
- **新型方案：**利用自然能源拦截负荷；利用更低温度热水供热，提升热泵效率



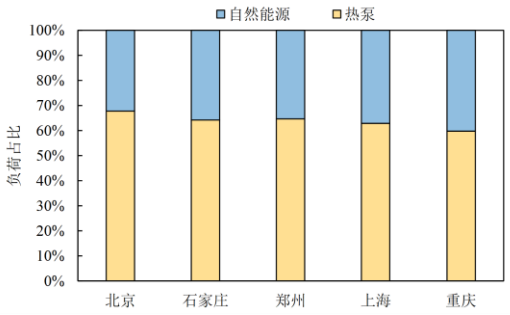

现有供热末端供水温度



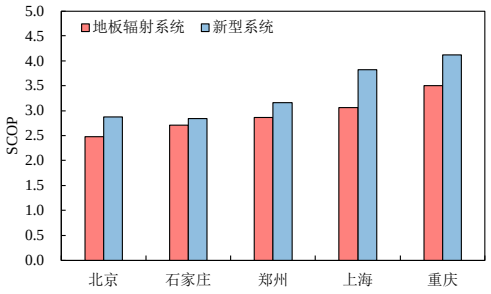

结合嵌管围护结构的空气源热泵系统

## □ 应用效果及工程示范

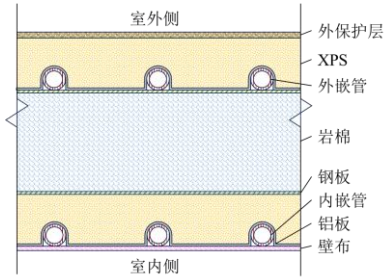
- 利用低品位自然能源处理相当部分的负荷
- 相比于地板辐射供热系统能效显著提升




负荷构成




季节能效比

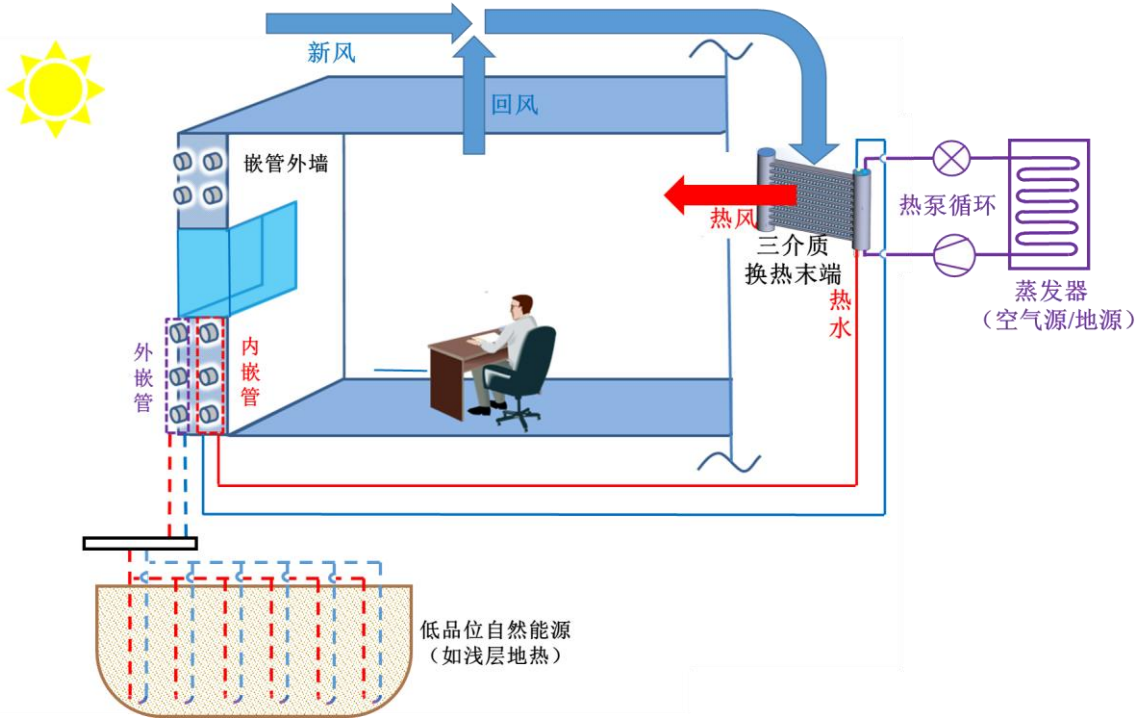



工程示范的嵌管围护结构外立面及结构

# 结合嵌管围护结构的水风同产热泵系统

## □ 适应间歇运行的水风同产热泵系统

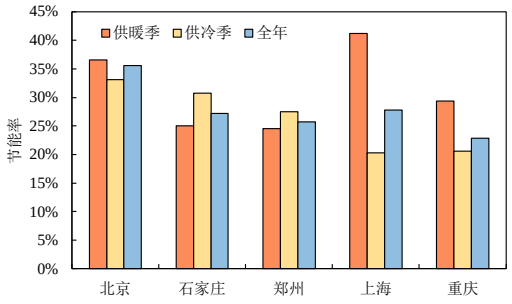
- **背景：**结合嵌管围护结构的空气源热泵无法满足间歇供暖启动阶段的热舒适，以及夏季除湿需求
- **新型方案：**用三介质换热器作为室内机，兼顾间歇运行启动阶段的热舒适和稳定运行的高能效



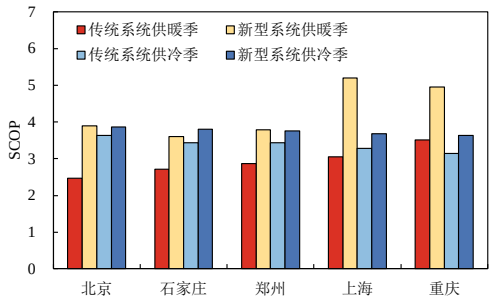

**结合嵌管围护结构的水风同产热泵系统**

## □ 应用效果

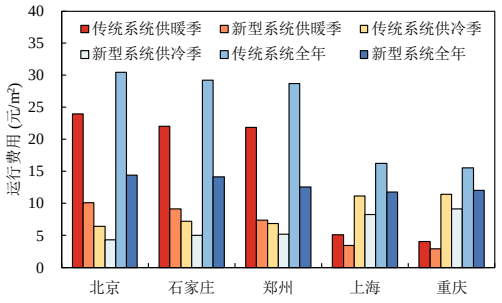
- 相比于集中供热+空调器系统、天氟地水系统节能效果显著
- 一套系统实现冷热供应，简化双末端系统形式，降低初投资



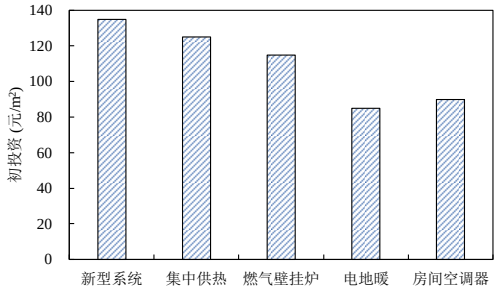

**节能率**




**能效比**




**运行费用**

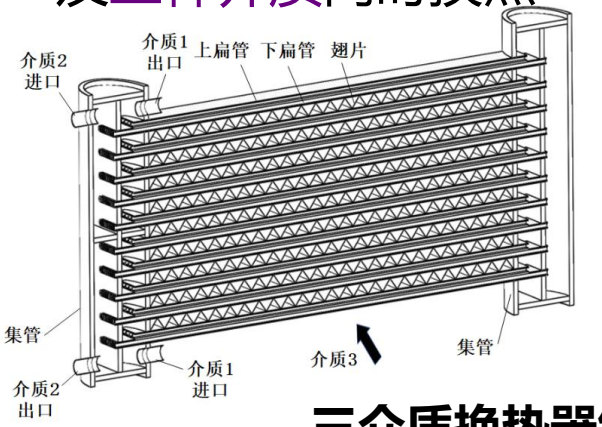


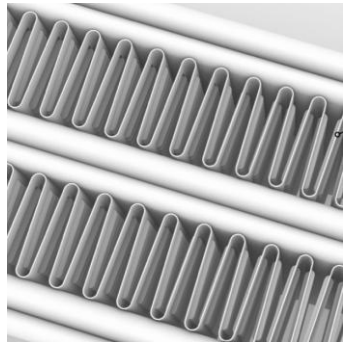

**初投资**

# 水风同产热泵的关键技术——三介质换热器

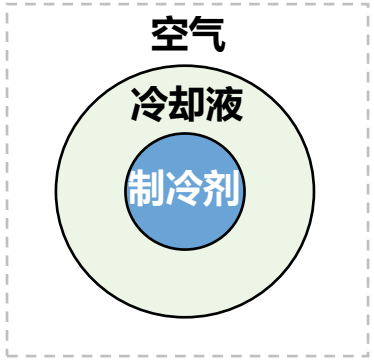
## □ 三介质换热器原理

- 实现三种介质中任意两两介质之间直接换热及三种介质同时换热

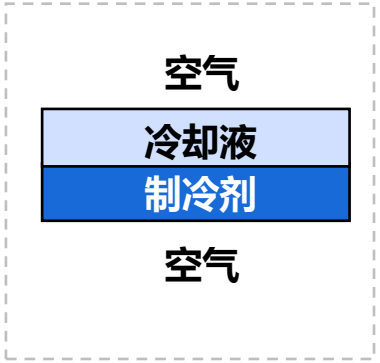


三介质换热器结构示意图

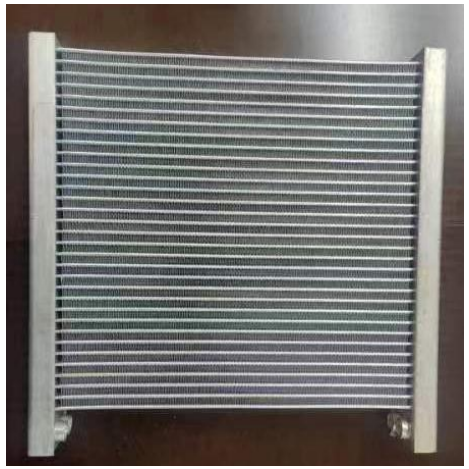


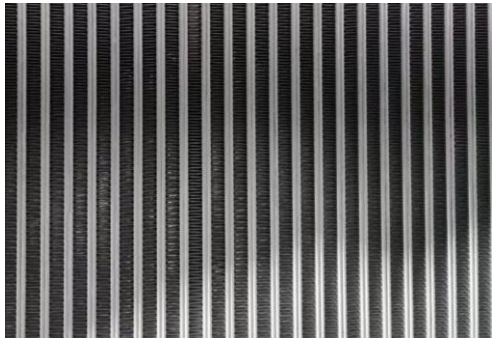

传统套管式结构

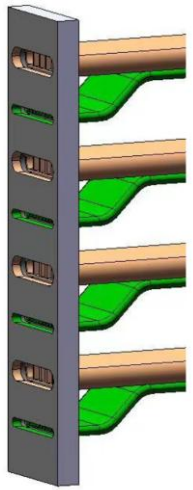


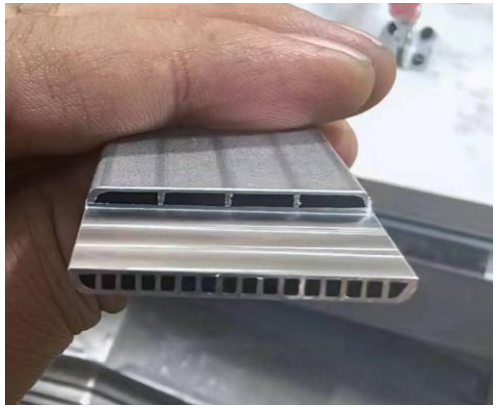

贴合扁管式结构

## □ 可量产三介质换热器结构







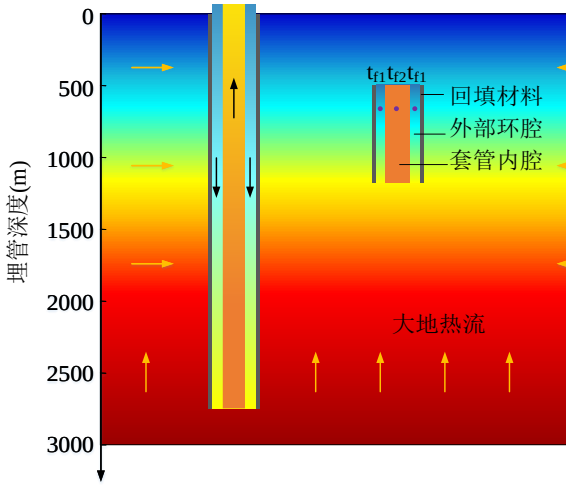


清华大学. 三介质换热器: CN201920475400.6 [P]. 2020-02-11.

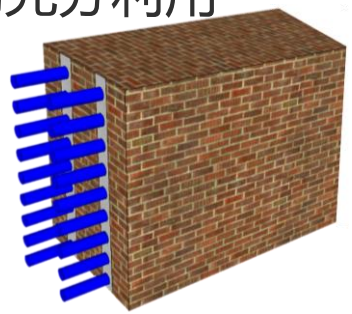
# 结合嵌管围护结构的中深层地热能直接供热系统

## □ 中深层地热能直接供热系统

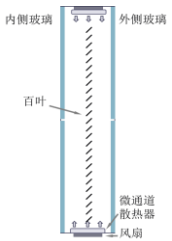
- **背景：**中深层地热能“取热不取水”技术制取的热水无法直接供热，仍需结合电热泵提升品位，消耗大量电能
- **新型方案：**利用30°C左右热水直接供热，实现净零能耗供热及中深层地热能的充分利用




套管式地埋管换热器



双层嵌管墙

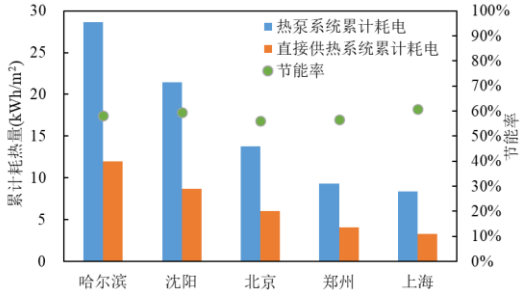



风盘窗

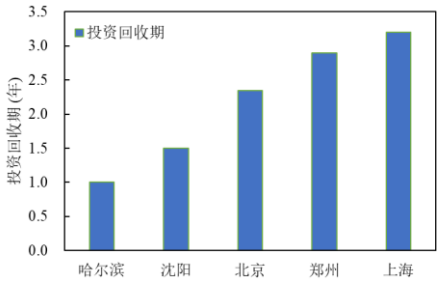
嵌管窗

## □ 应用效果

- 相比于目前高效的中深层地热地埋管热泵供热系统具有更好的技术经济性




**节能效果**




**投资回收期**

- 实现净零碳排放供热，助力供热领域碳排放的提前实现
- 应用于北方城镇建筑供热，相当于年开采标准煤1.2亿吨或天然气14.4万亿立方米，对能源安全意义重大

# 目录


1 背景

2 空调负荷数量与品位

3 分级空气处理装置

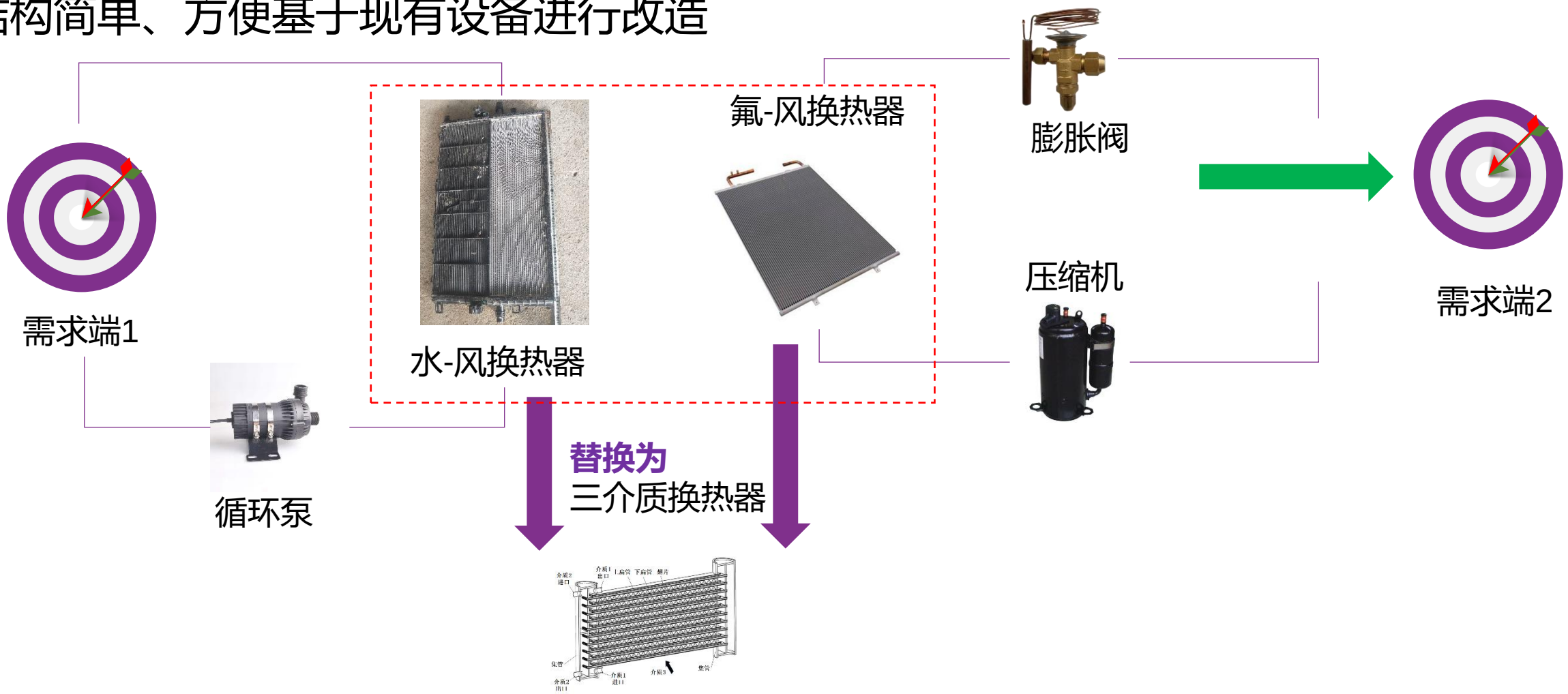
4 与嵌管围护结构相结合的空调系统

5 水氟互联空调系统

6 总结

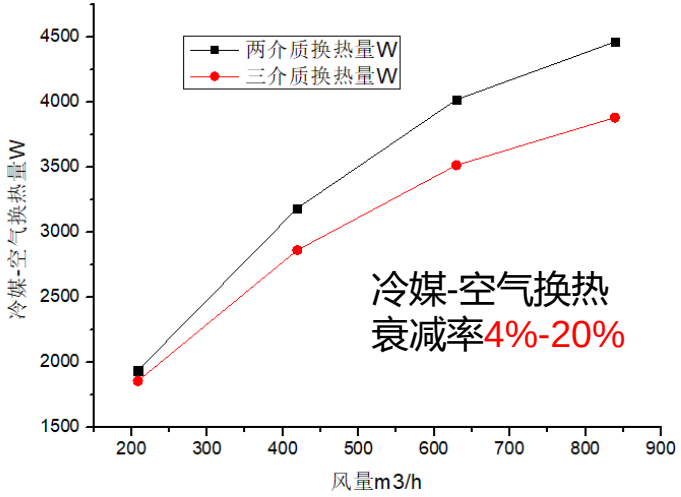
# 5.1 三介质换热器的性能及特点

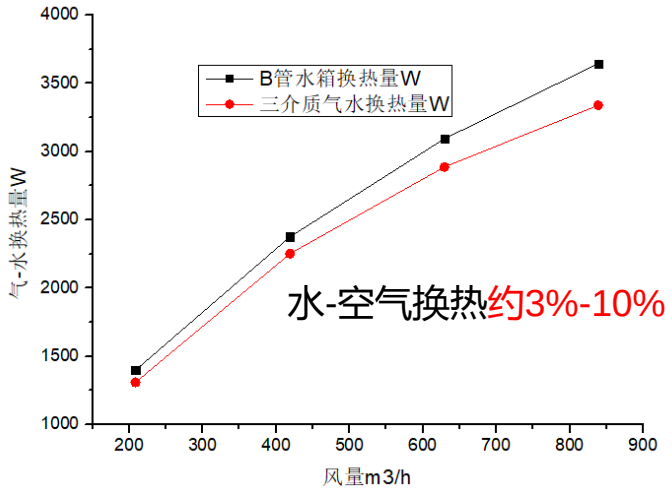
**性能及特点1：**
结构简单、方便基于现有设备进行改造



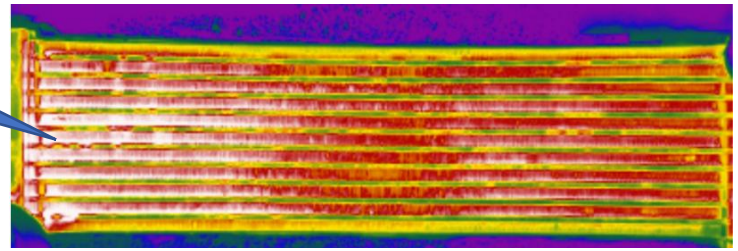
# 三介质换热器的性能及特点

**性能及特点2：**
优良的热工性能

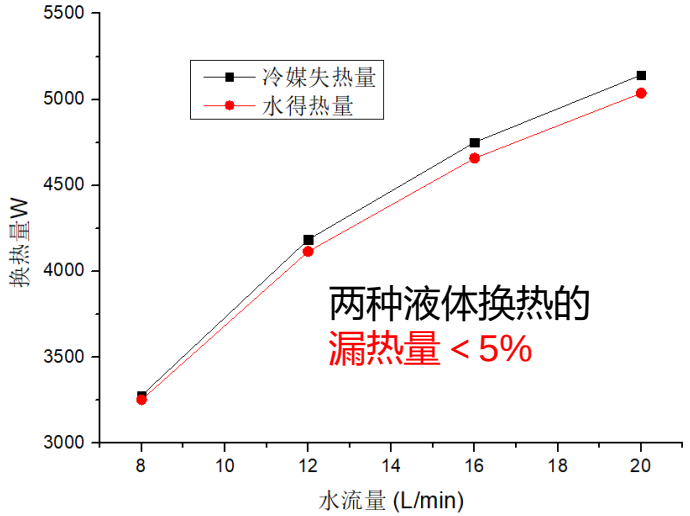



优良等温特性(冷凝器)

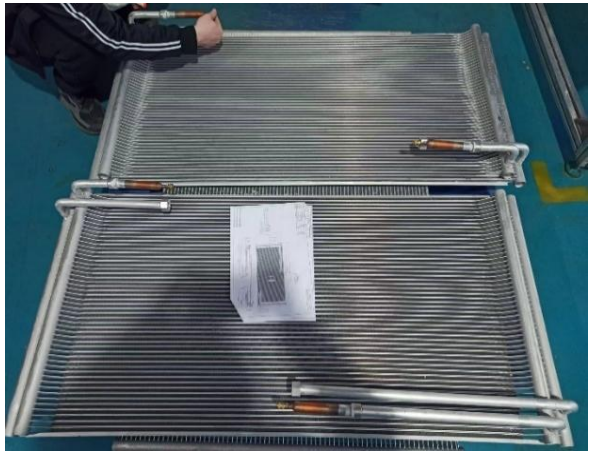


均匀结霜特性(蒸发器)



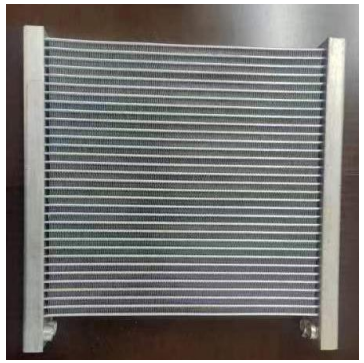
# 三介质换热器——部分换热器

多联机外机



空气源热泵外机

储能热管理系统



新能源汽车

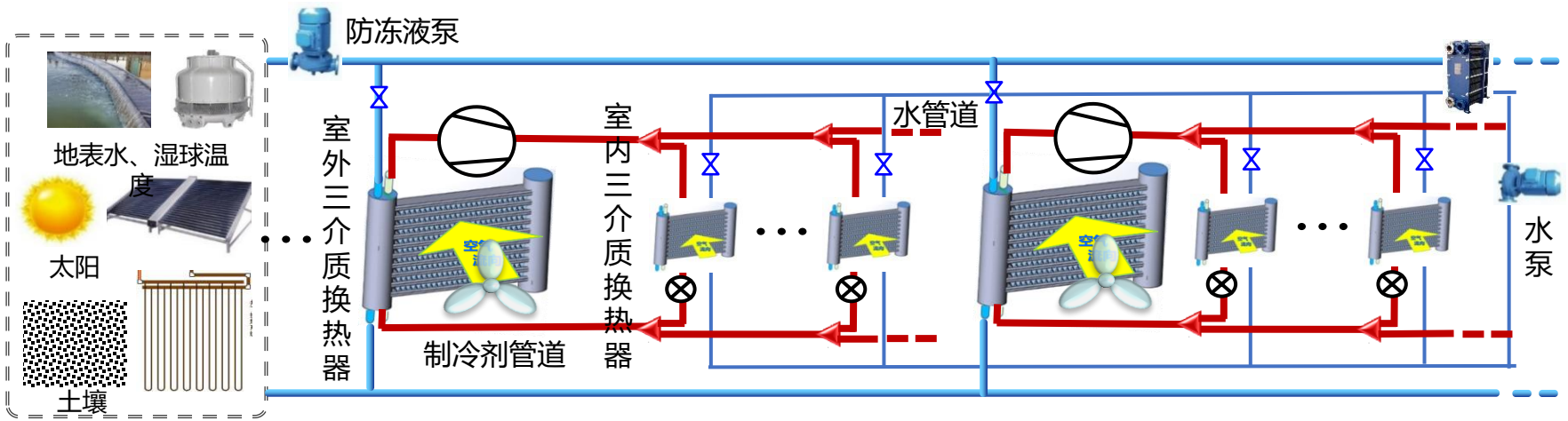
空调室内机

# 5.2 水氟互联空调系统在民用建筑中的应用—水氟互联机

清華大學 Tsinghua University

| | 优势 | 劣势 |
|---|---|---|
| 冷热水空调系统[1]<br>(起源于美国) | ✓ 实现长距离的冷热量供应 | × 多次换热、能源品位损失高<br>× 输配能耗高，部分负荷运行能效低<br>× 占地空间大、系统初投资高 |
| 多联机系统[2]<br>(起源于日本) | ✓ 采用直膨方案，换热环节少，输配能耗较低，系统能效高<br>✓ 占地面积小，布置灵活 | × 受制冷剂充注量限制<br>× 部分时间、部分空间使用特性，机组长期小负荷运行，其运行能效低<br>× 逆循环及热气旁通除霜方式严重影响冬季供热效果 |

**针对现有的主流空调技术的问题，提出了水氟互联空调系统**

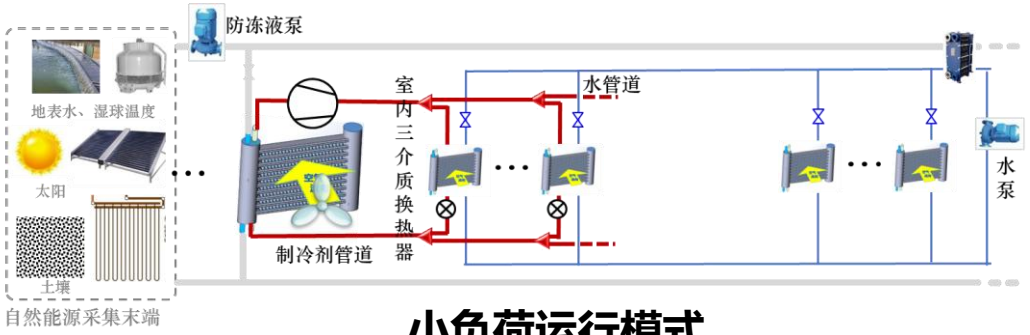



水氟互联机系统形式

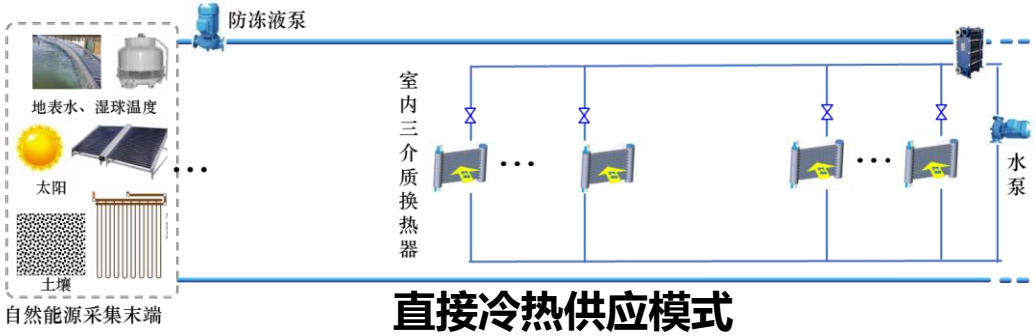
- ✓ 减少机组制冷剂充注量
- ✓ 低负荷运行性能提升
- ✓ 直接利用自然能源供应冷热
- ✓ 利用复合源提升系统能效
- ✓ 高效除霜技术
- ✓ 同时冷热供应技术
- ✓ ……


[1] 刘雪峰. 中央空调冷源系统变负荷运行控制机理与应用研究[D].华南理工大学,2012.
[2] Zhang G , Xiao H , Zhang P ,et al.Review on recent developments of variable refrigerant flow systems since 2015[J].Energy and Buildings, 2019, 198(SEP.):444-466.

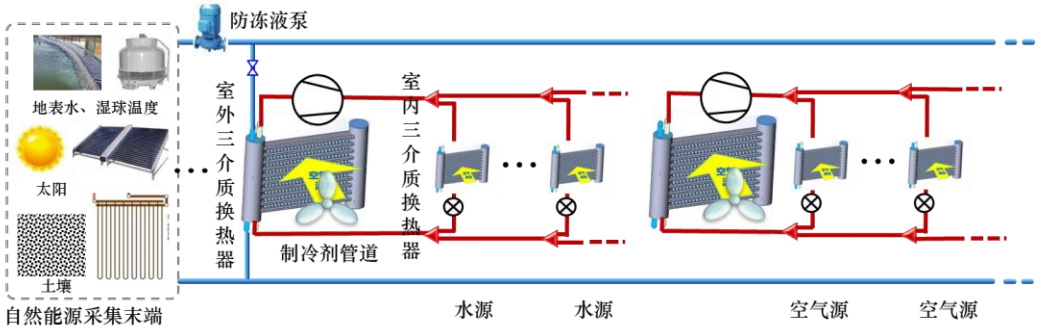
# 水氟互联机的运行模式




小负荷运行模式




直接冷热供应模式




复合源模式

- **三介质室内机**

用一套机组承担全部负荷，应对多区域低负荷运行需求

- 室外温度35℃，20%负荷率制冷时节能42%

- **三介质室内机**

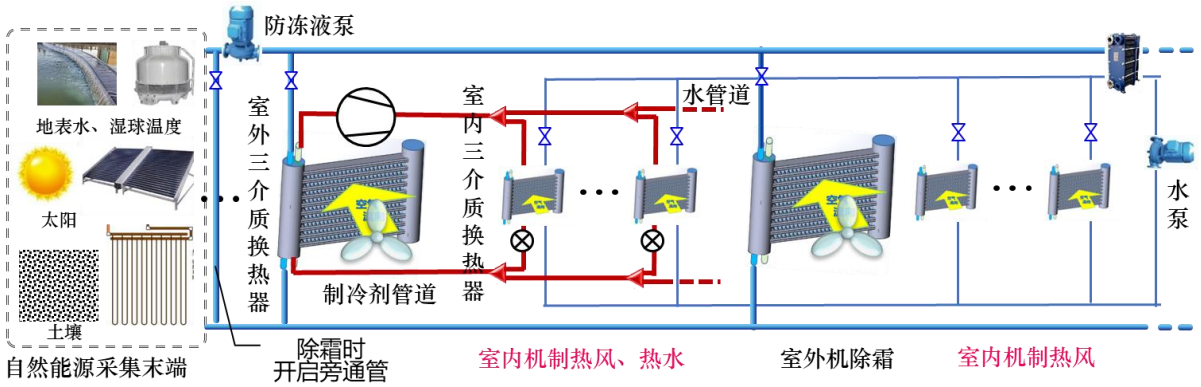
可直接利用外界能源供应冷热（市政热水、自然能源等）

- **三介质室外机：**

通过复合源技术利用自然能源提升热泵能效

- 对于北京和上海的典型办公建筑，该系统结合冷却塔应用时的季节能效比实现21.9%和26.9%的提升

# 水氟互联机的运行模式




**高效除霜模式**

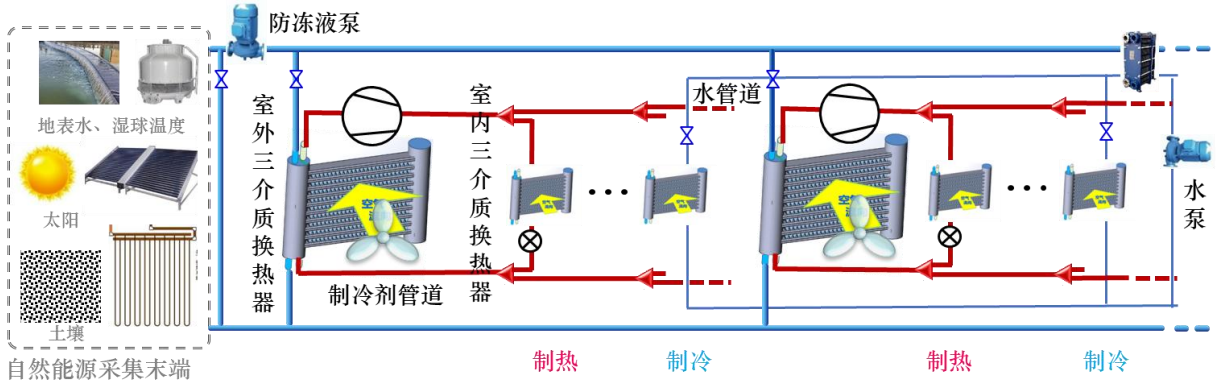
- **三介质室外机**

利用外界热源除霜

- **三介质室外机+室内机**

利用水路将内机的产热调度至外机除霜

避免常规逆循环除霜导致的室内供热量及性能衰减




**同时冷热供应技术**

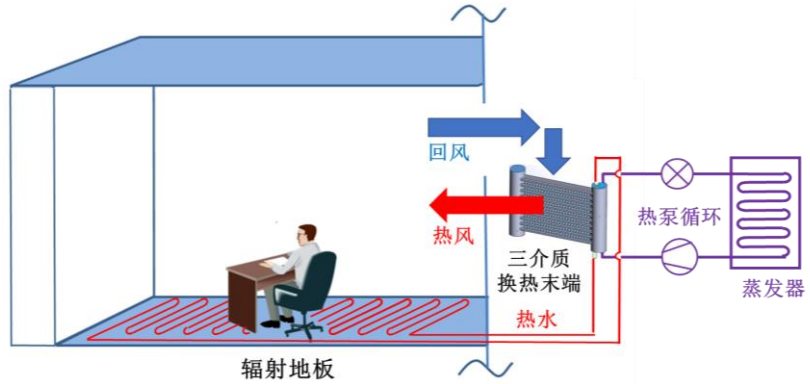
- **三介质室外机+室内机**

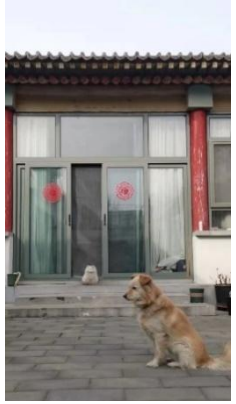
建筑同时有冷热需求时，可通过水路调度外机与内机之间的能量实现同时冷热供应

# 水氟互联机的应用拓展

## □ 代替天氟地水的双末端间歇供暖系统

- 适用于某房间有间歇供暖需求的场景
- 与传统方案相比，舒适性提高，季节节能率在20%

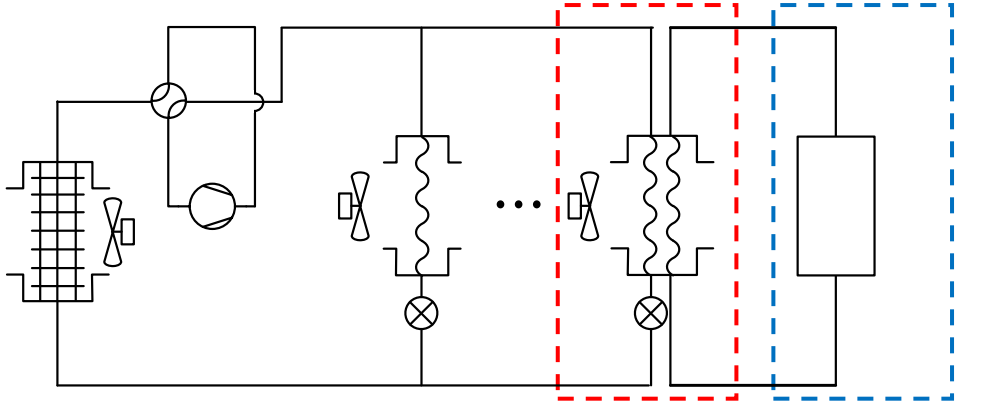


双末端应用于建筑中的同一房间

## □ 应对不同房间需求的双末端系统

- 满足不同房间末端需求
- 单机组实现水风同产

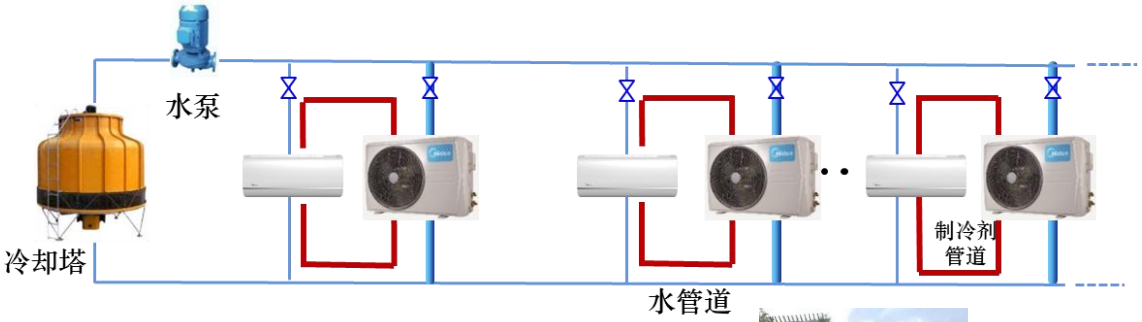


双末端应用于住宅中不同需求的房间

# 水氟互联机的应用拓展

## □ 集中复合源空调系统

- 在源侧利用自然能源提升制冷/热泵循环能效
- 在用户侧利用自然能源直接供冷热以提升能效



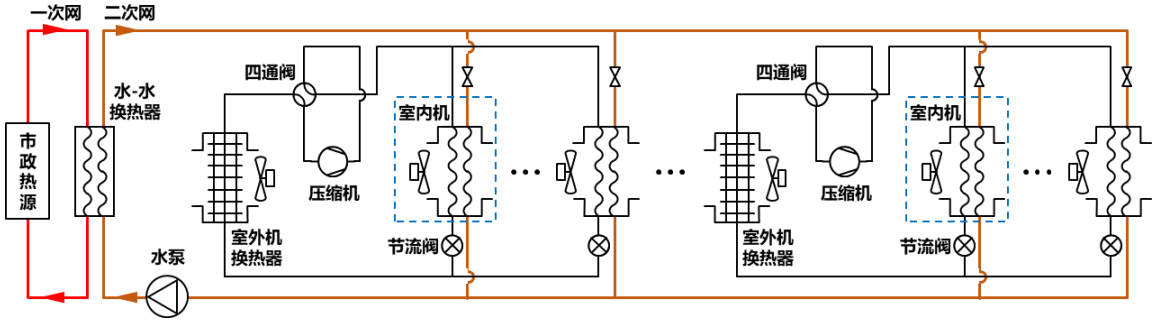
集中冷却塔

集中地埋管

多户及多栋建筑

## □ 可利用市政热网供暖的双热源系统

- 实现直膨式供热与市政热水供热灵活切换
- 利用一套末端保障建筑全年的冷热供应



热力站集中供热

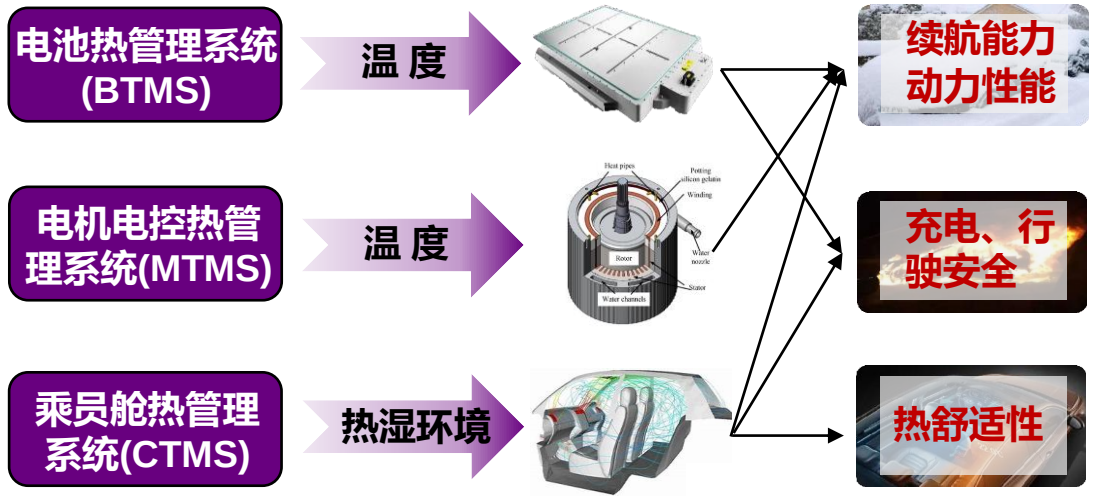
多楼栋多户建筑

# 5.3 水氟互联空调系统在电动汽车热管理中的应用



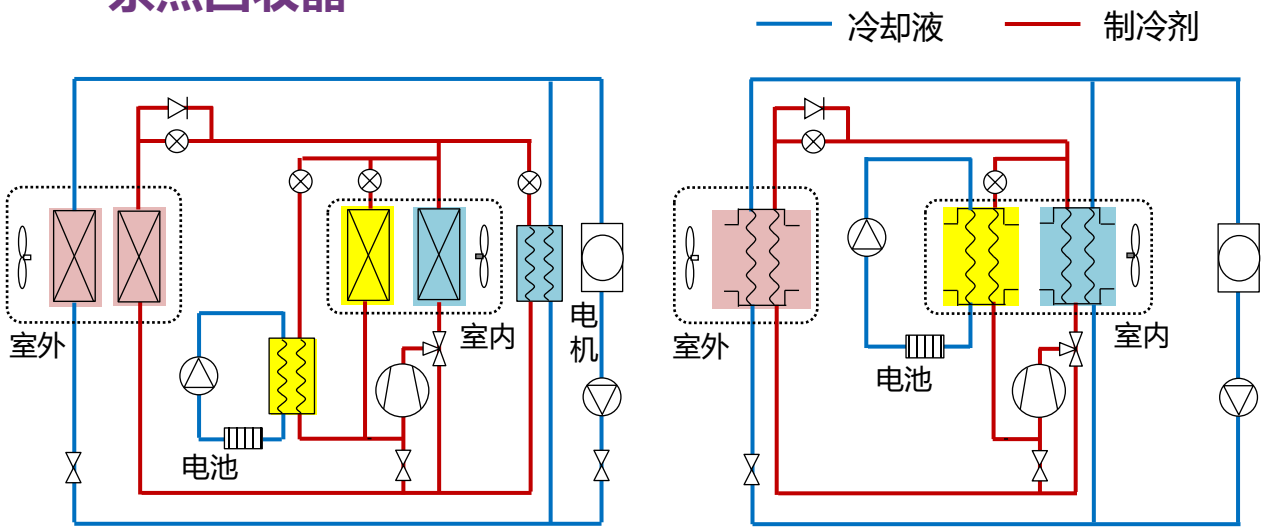
## □ 电动汽车热管理系统

- **背景：**我国电动汽车产业高速发展，**电动汽车热管理系统**对于**电池安全**、**续航里程**具有重要影响
- **现有技术：**热泵空调+电池液冷/直冷+电机余热回收，乘员舱、电池、电机电控热管理**相互耦合**、**高度集成**
- **存在问题：**为满足不同行驶工况**多样化热管理需求**，现有整车热管理系统普遍存在**换热流程复杂**、**高低温能效低**、**难以轻量化**等问题




## □ 三介质换热器应用方案

- **应用方案①：**三介质换热器替代原**室外冷却液散热器+制冷剂换热器**
- **应用方案②：**三介质换热器替代原**室内蒸发器+电池冷却器**
- **应用方案③：**三介质换热器替代原**室内冷凝器+电机余热回收器**




常规热管理系统方案　　基于三介质换热器的系统方案

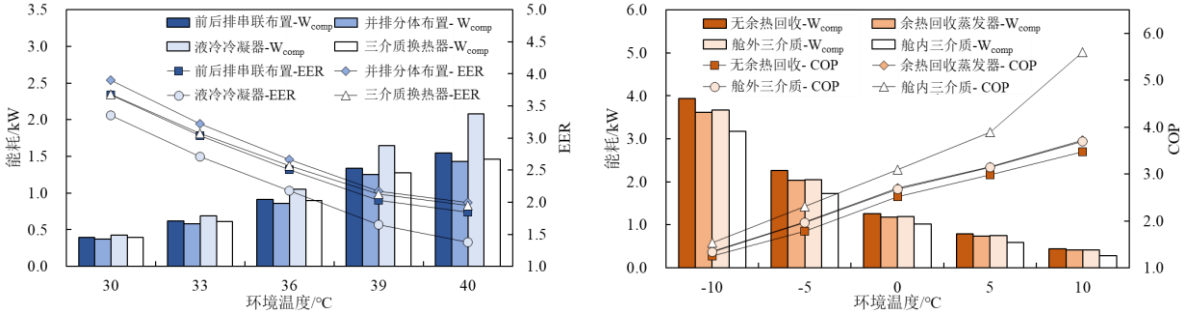
# 水氟互联空调系统在电动汽车热管理中的应用

清華大學 Tsinghua University

## □ 应用效果

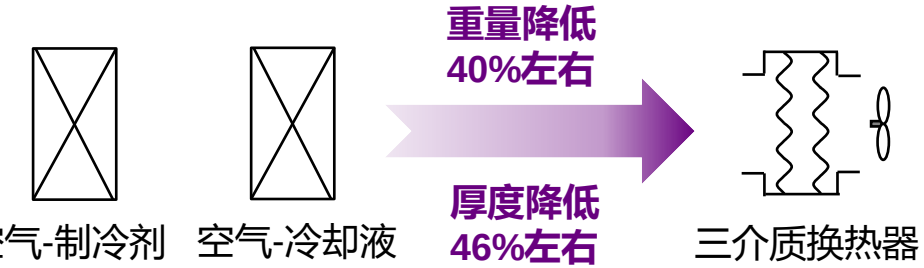
### ● 提升能效、降低热管理能耗

- 夏季工况，与常见前端模块风冷散热器、风冷冷凝器**前后排布置方案**相比，应用三介质换热器能够**降低冷凝温度**
- 冬季工况，与常见余热回收方案相比，应用三介质换热器能够还实现**余热直接加热空气**、**余热回收除霜**



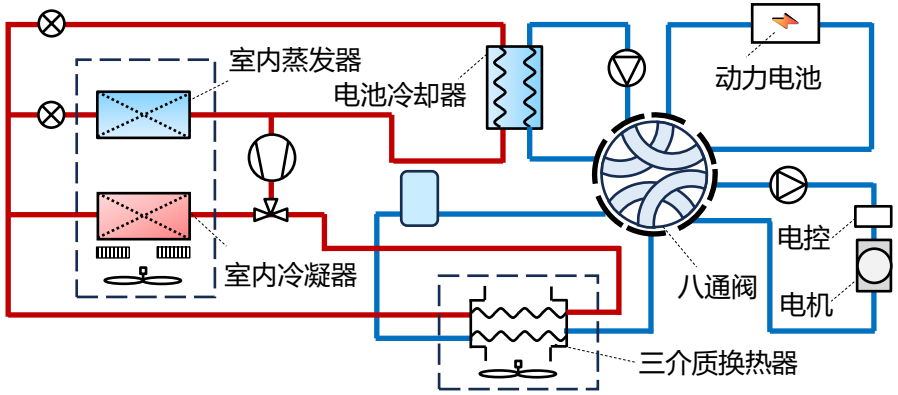

### ● 简化系统结构，实现轻量化、集成化

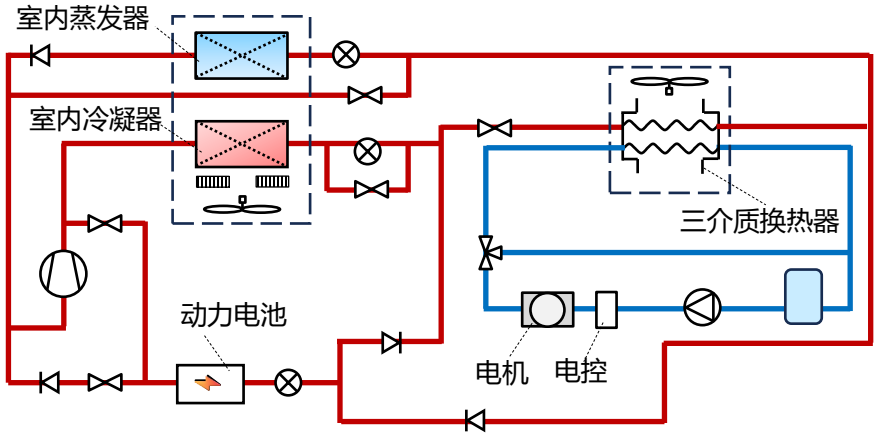
- 将三介质换热器应用于电动汽车热管理系统能够**减小**换热模块**布局空间**、**降低**车辆**载重**、**提高**热管理系统**集成度**




## □ 应用可行性

仅需在原热管理系统基础进行换热器替换，无须对改造原系统整体构架，应用简单



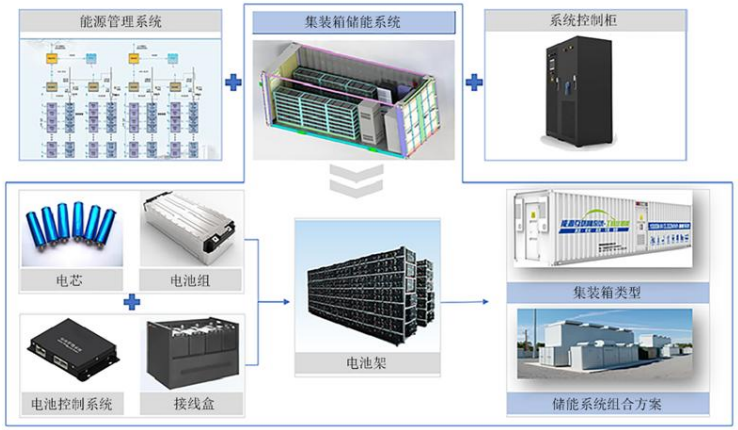




**三介质换热器在Tesla ModelY、比亚迪海豚热管理系统中的试应用**

# 5.4 水氟互联空调系统在储能中的应用

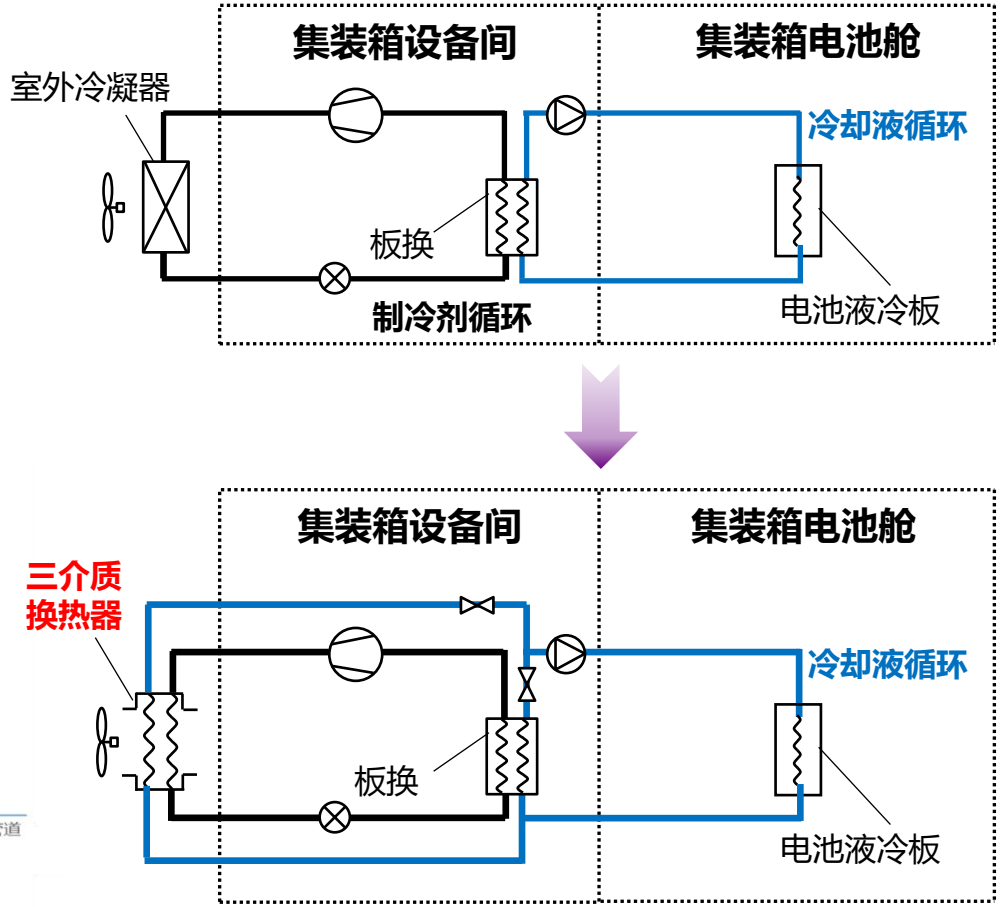
## □ 集装箱式储能热管理系统

- **背景：集装箱式储能系统**集成度高、便于安装，应用广泛；随着储能密度不断增大、热失控安全事故频发，**储能热管理**对于**安全、可靠、高效运行**至关重要
- **现有技术：**传统**风冷方案**结构简单、成本低，但散热性能差、电池温度均匀性差，**液冷方案**逐渐成为主流
- **存在问题：**全年机械制冷、**系统能效低**；液冷方案易导致**电池包表面凝露**，导致电池包腐蚀乃至短路，**影响电池运行性能与安全**



## □ 三介质换热器应用方案

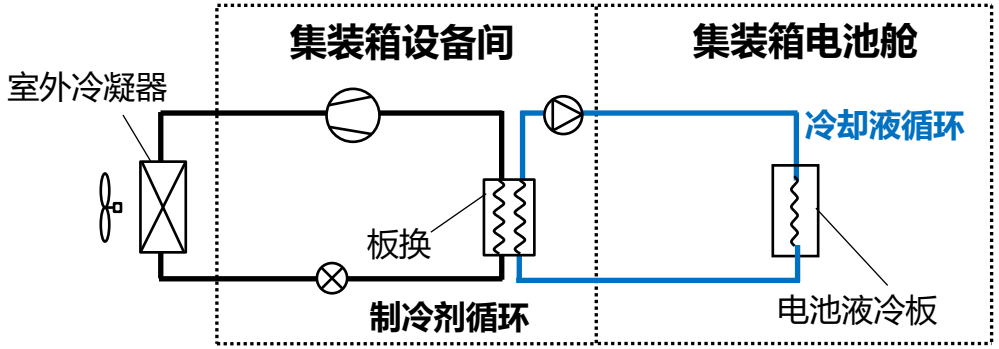
- **应用方案①：室外侧应用三介质换热器**，可实现**自然冷却/机械冷却**自由切换，提高机组**全年能效**

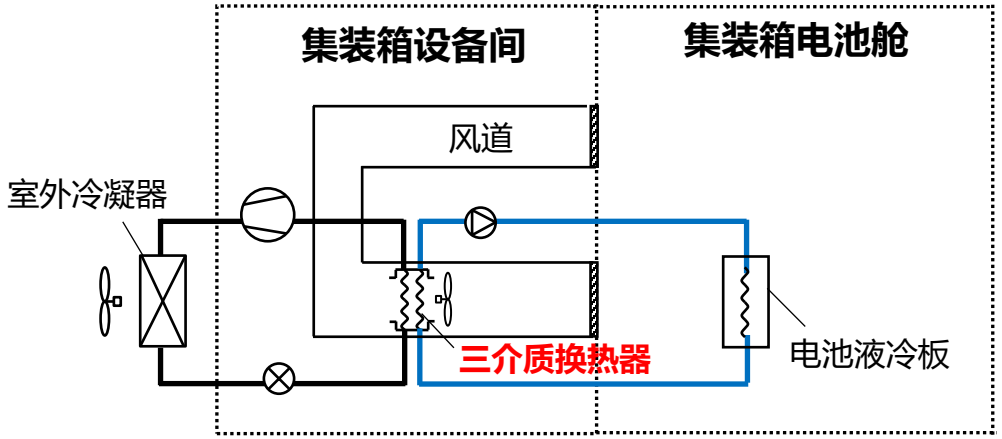


# 水氟互联空调系统在储能中的应用

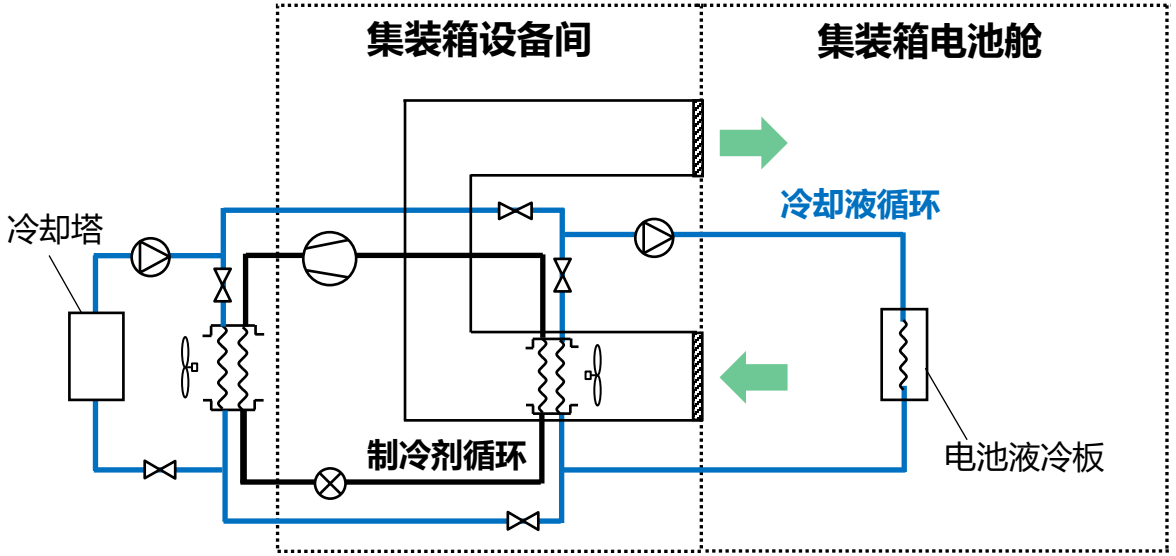
## □ 三介质换热器应用方案

- **应用方案②：室内侧应用三介质换热器**，可实现**电池液冷**的同时**有效控制电池舱湿度**，**避免凝露**损坏电池



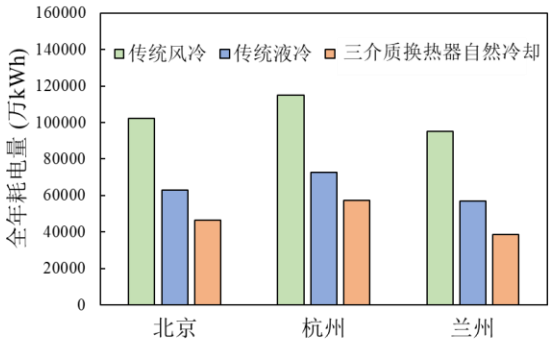




## □ 综合方案及应用效果



集中式冷却塔互联

**全年能效提升13.9%-47.4%**




节能效果评估

# 目录


1 背景

2 空调负荷数量与品位

3 分级空气处理装置

4 与嵌管围护结构相结合的空调系统

5 水氟互联空调系统

6 总结

# 结语

- 降低供热和空调系统能耗对我国碳中和目标实现、民生保障与能源安全意义重大；
- 现有供热和空调系统存在单一温度冷热源处理负荷、空气处理装置一种流程全年使用、冷热源为单一源/汇或仅产风/水的不足；
- 传统空调理论仅关注负荷数量，负荷品位概念揭示了处理负荷的合理冷热源温度，开辟了空调系统节能的新方向；
- 采用流程可变的分级空气处理装置可以显著降低冷热源品位，提高空气处理设备与输配效率；
- 采用与嵌管围护结构结合的空调系统，可以实现自然能源充分利用及热泵效率提升，兼顾高能效和热舒适，还可以实现近零能耗供热；
- 水氟互联空调系统充分利用了直膨系统与风机盘管的优势，具有适应性强调、能效高的优势，有望成为与风机盘管、多联机并列的第三种空调系统形式。

# 谢 谢!

清华大学 李先庭

xtingli@tsinghua.edu.cn