



清华大学

Tsinghua University

双碳目标背景下建筑空调供暖技术的发展趋势

李先庭

清华大学 建筑学院 建筑科学技术系

2022/1/11

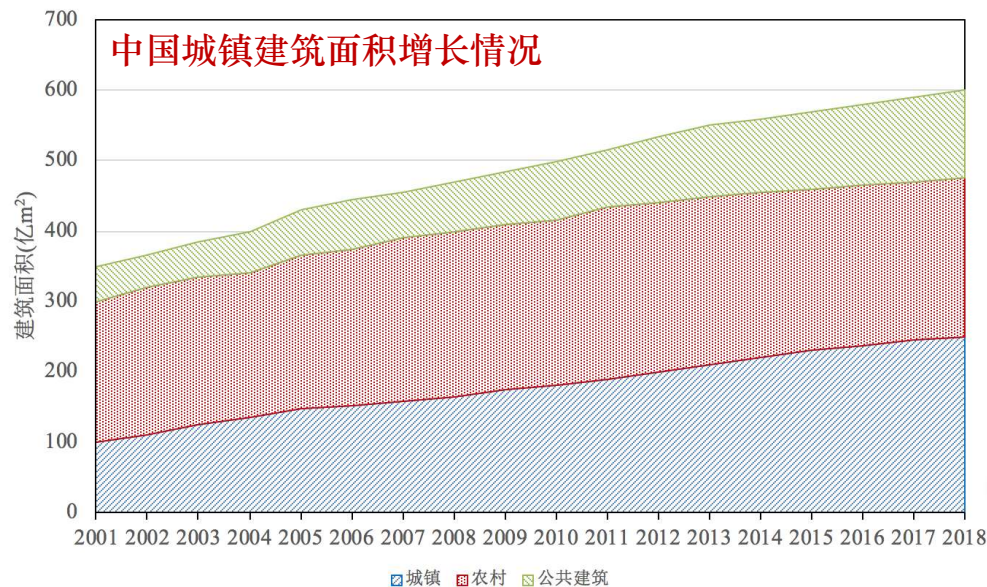
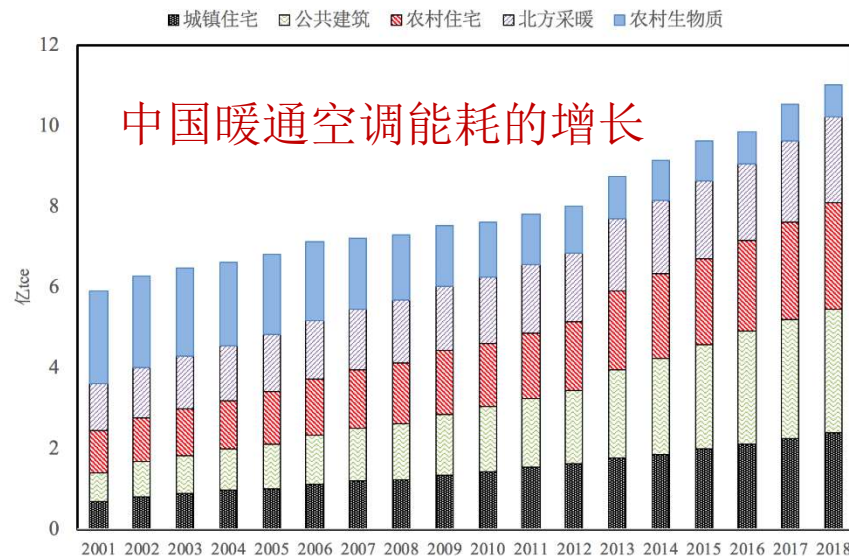


目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

中国建筑能耗快速增长

- 建筑能耗增速快
- 其中，空调、供暖和热水能耗占比最大
- 建筑面积快速增长



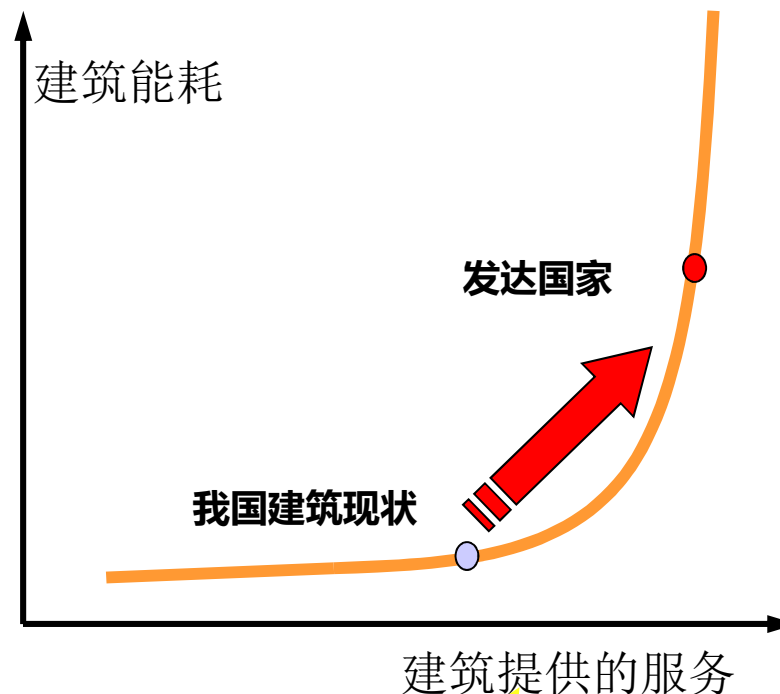
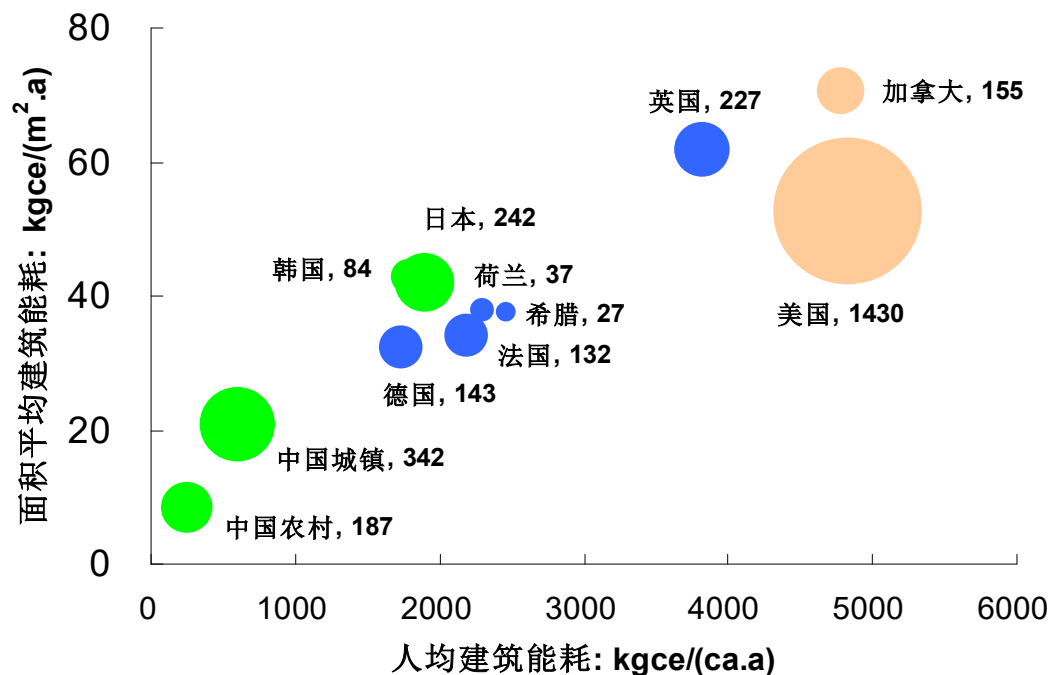
- 城镇和公共建筑面积每年增加约10亿平方米
- 空调、供暖和生活热水能耗超过建筑能耗60%

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. 北京：中国建筑工业出版社，2020 .

我国建筑能耗状况与可选路径

2005年世界主要国家的建筑一次能耗

圆圈直径大小：代表全国总能耗 (M tce)



如果我国城市人均建筑能耗达到美国50%水平，我国的建筑能耗将超过目前中国总能源供应量

中国走发达国家的路
会导致灾难性后果

中国面临的能源和环境问题

- 中国是目前世界上**温室气体**排放量最大的国家
- 我国能源结构以**燃煤**为主
- 城市**雾霾**天气频发



中国未来的能源与气候发展目标

□ 巴黎协议

- 控制地球温升不超过2°C。
- 江亿院士报告指出：在2050年，我国人均CO₂排放量从目前的7吨/人降低到2.5吨/人。

□ 刚刚结束的格拉斯哥COP26峰会确定应努力控制地球温升不超过1.5°C

□ 2030年实现碳达峰，2060年实现碳中和

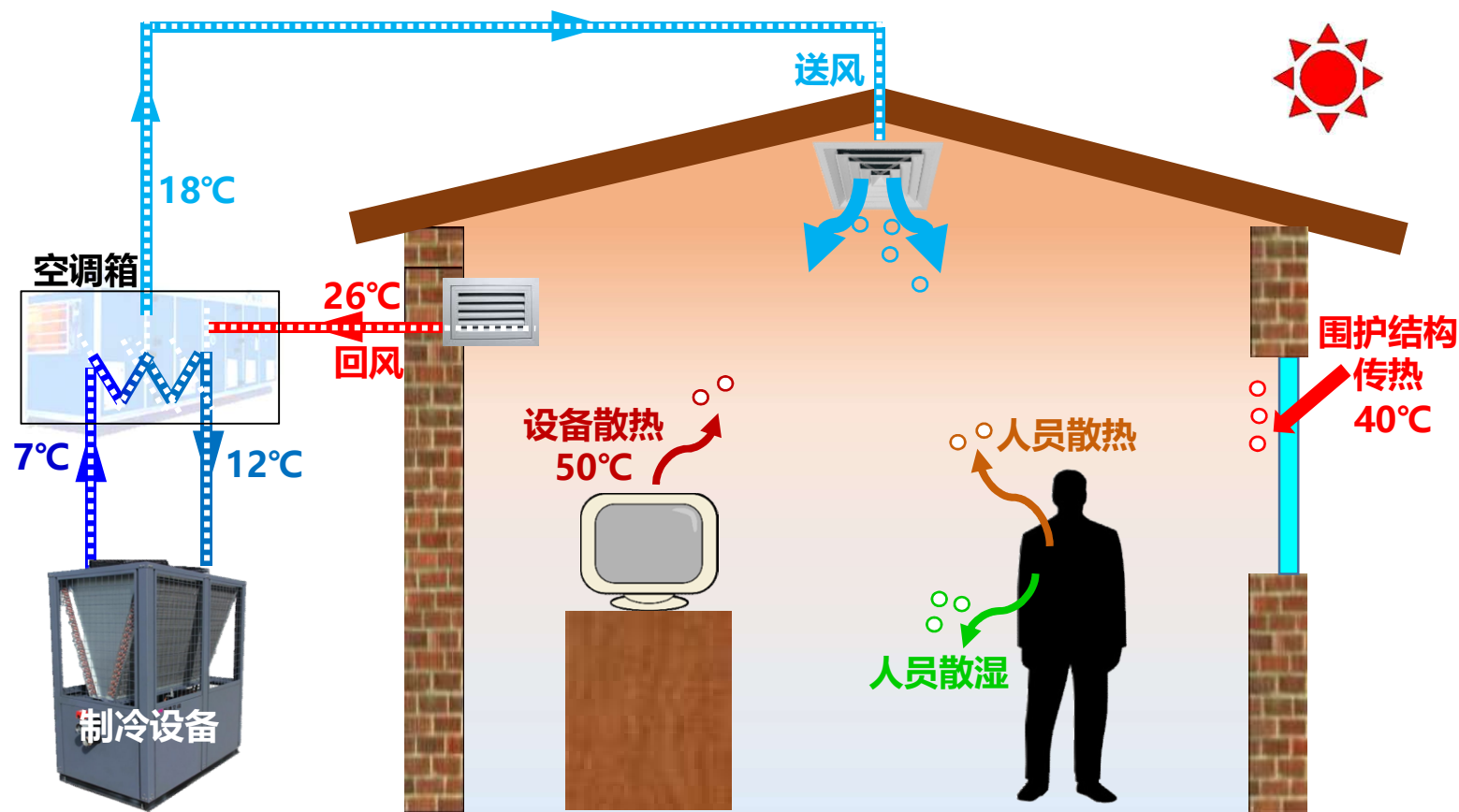
□ 供暖空调作为美好生活最基本的要求会持续增长

为解决以上问题、实现节能减排目标，
供热和空调领域的低碳发展越来越受到广泛重视！

目录

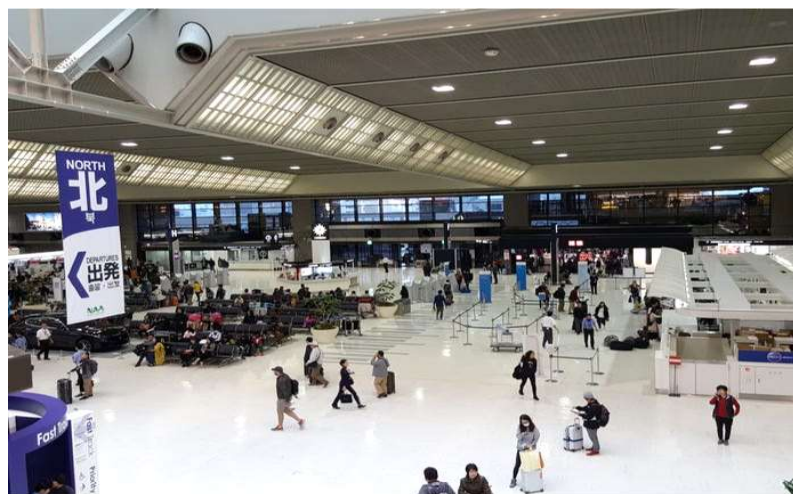
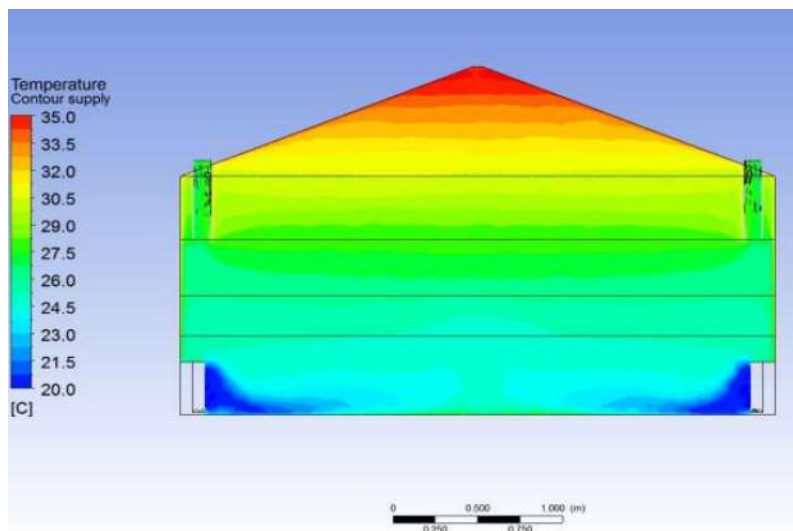
- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

传统空调方法及其不足



- 不同温度热源均匀混合形成空调负荷
- 机械方式统一制取所需冷热量

室内环境通常为非均匀且人员保障区占比很小



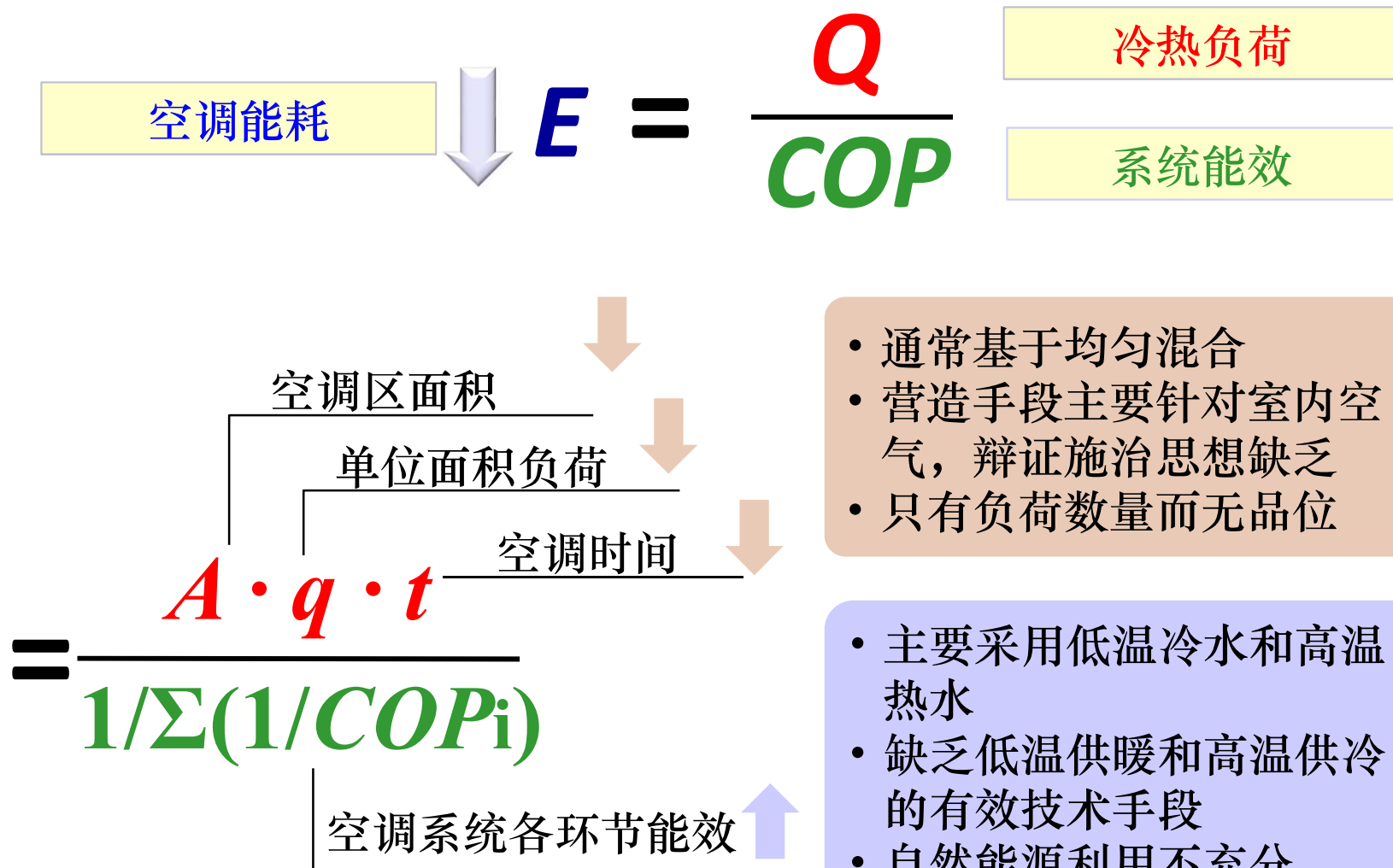
**室内温度
非均匀**

温度分层
湿度分层
气流组织差异

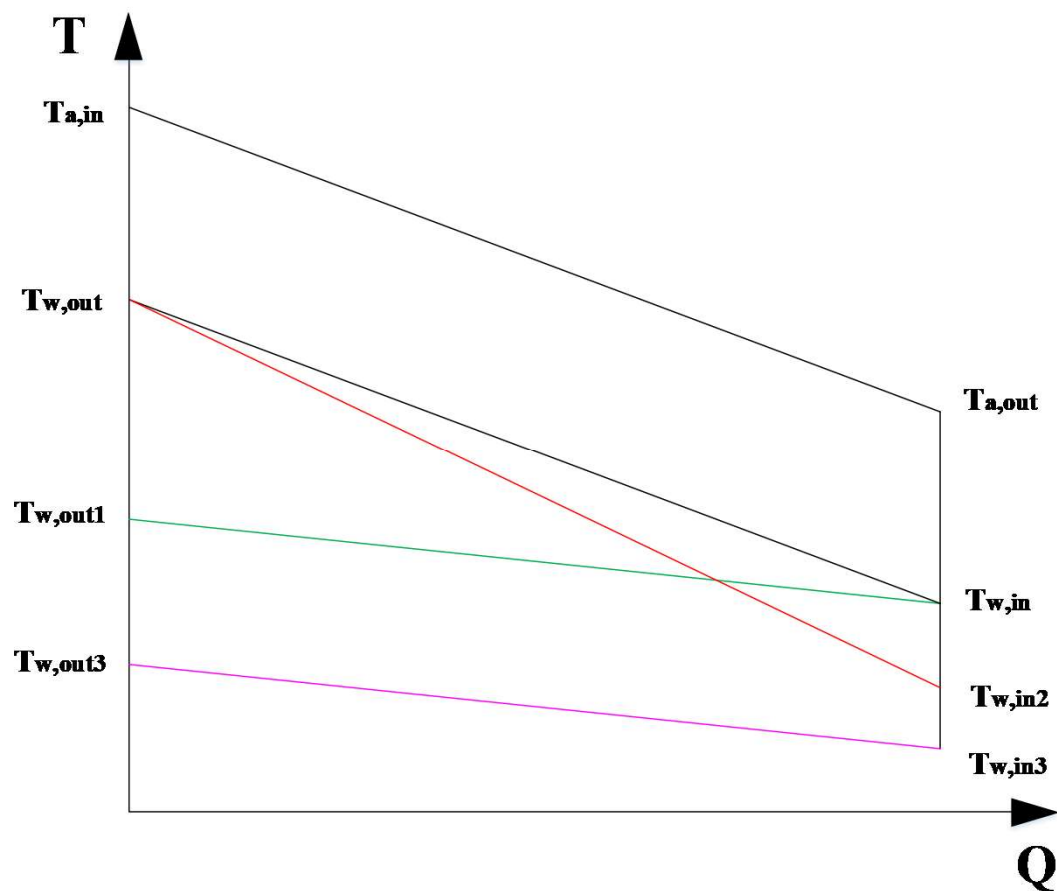
.....

**人员保障区
< 5%**

降低供热和空调能耗的传统技术路线存在的不足

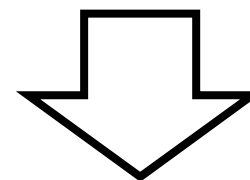


传统空调负荷处理过程



传统空调系统中空气降温过程T-Q图

- 设计温差大于经济温差
- 多个AHU共用同一冷热源
- 供水温度不随气候变化调节

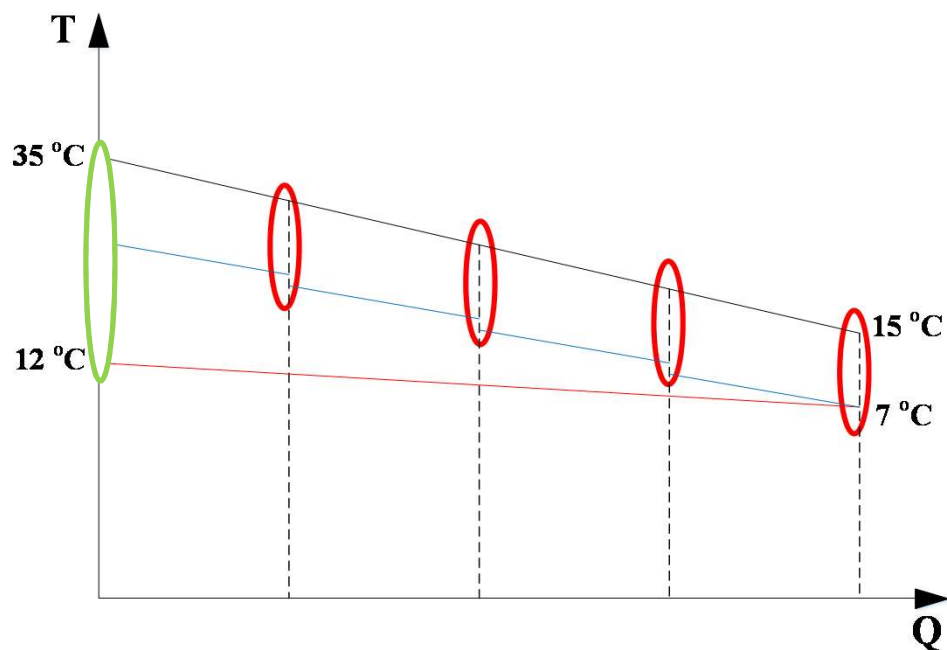


导致

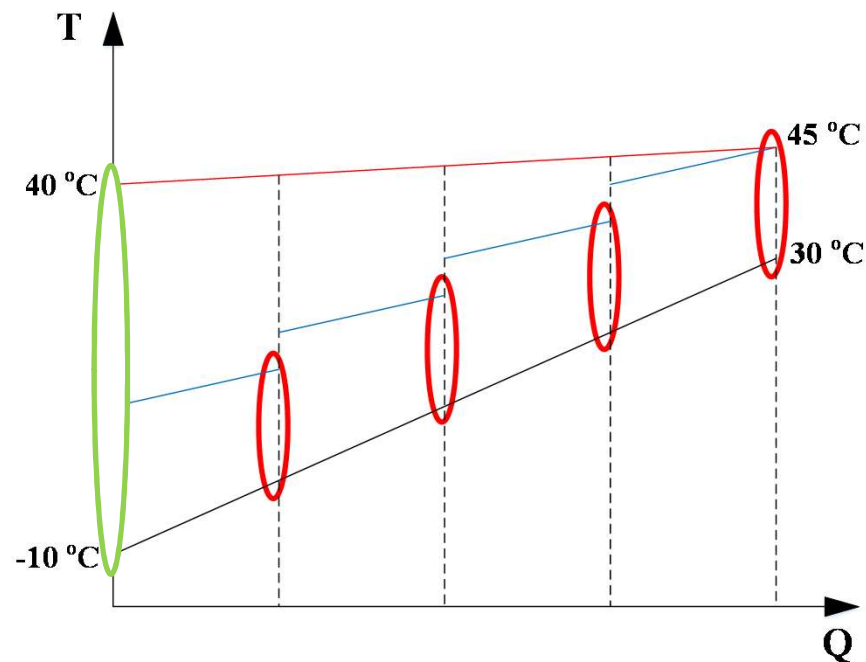
空气处理过程通常采用低温冷水或高温热水

实际空气处理过程的换热温差往往大于经济温差
冷热温度品位存在很大的浪费

合理换热温差下冬夏季新风处理所需要的水温



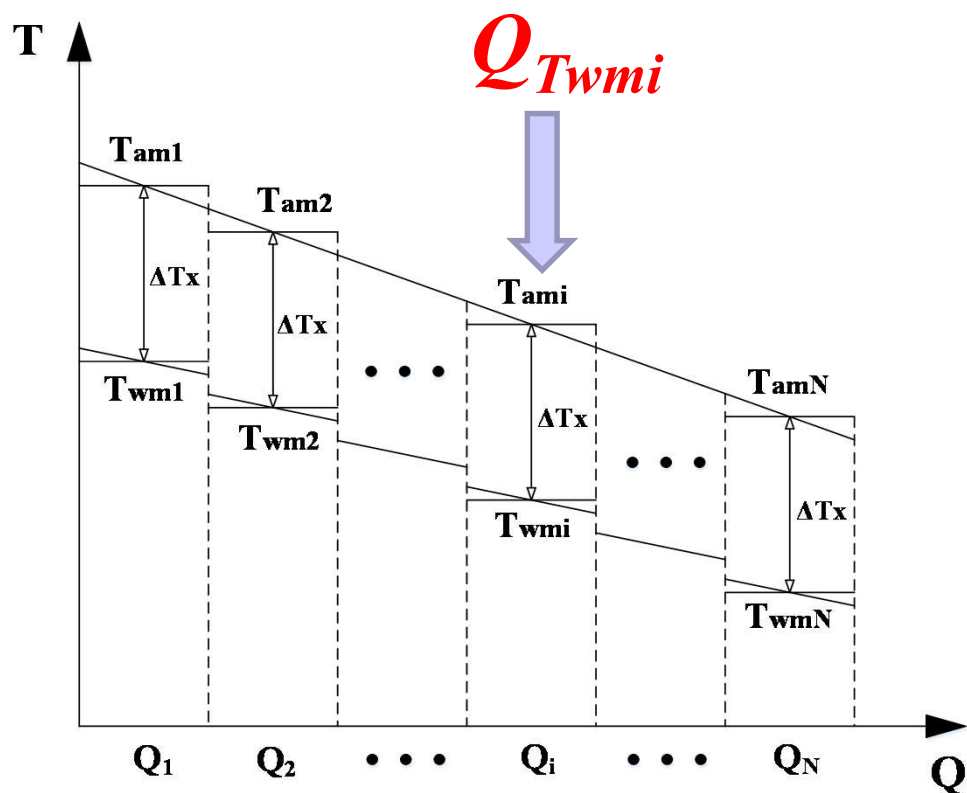
空气冷却降温过程



空气加热升温过程

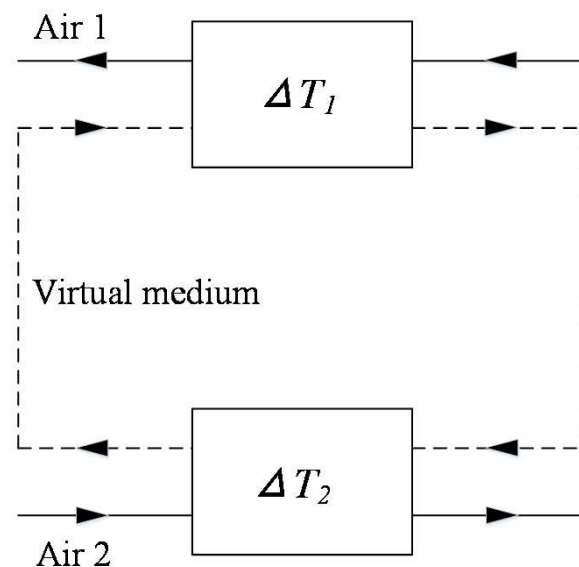
- 由于采用单一高品位冷热源处理空气，换热器各部分换热温差不均匀，换热器两端空气-水换热温差差异较大
- 通过将夏冬季空气处理过程分级的方式，使各级均在经济温差下换热，就可以采用更高温的冷水或更低温的热水处理负荷

空调负荷品位的描述方法



负荷品位分析图

空气处理过程负荷品位：空气-水之间
换热温差为经济温差，且水侧温升
(降) 在合理的范围内，则所处理空气
负荷的品位用换热器平均水温来表征



风-风换热量品位分析图

对于风-风换热器，
所处理空气负荷品位
用虚拟介质平均温度
来表征，风与虚拟循
环介质为经济温差

基于空调负荷品位的理论能耗水平

- 传统负荷计算式：
$$Q = m \times (h_i - h_o)$$

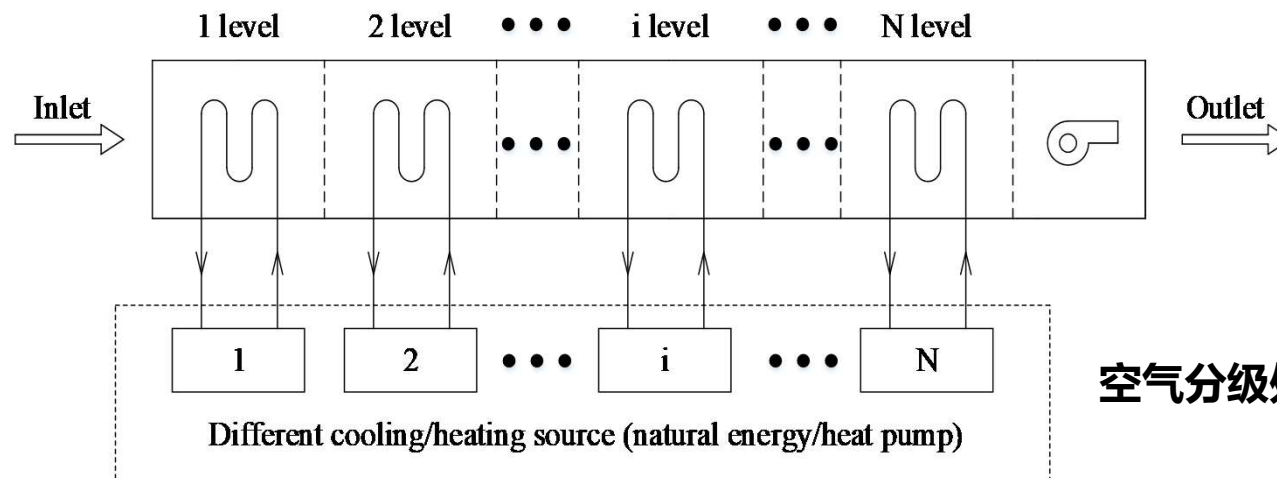
风量 焓差

- 负荷分品位表达式：

$$Q = Q_{T_{wm1}} + Q_{T_{wm2}} + \dots + Q_{T_{wmi}} + \dots + Q_{T_{wmN}}$$
$$T_{wmi} = T_{ami} - \Delta T_x \quad (\text{cooling}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N)$$
$$T_{wmi} = T_{ami} + \Delta T_x \quad (\text{heating}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, N)$$

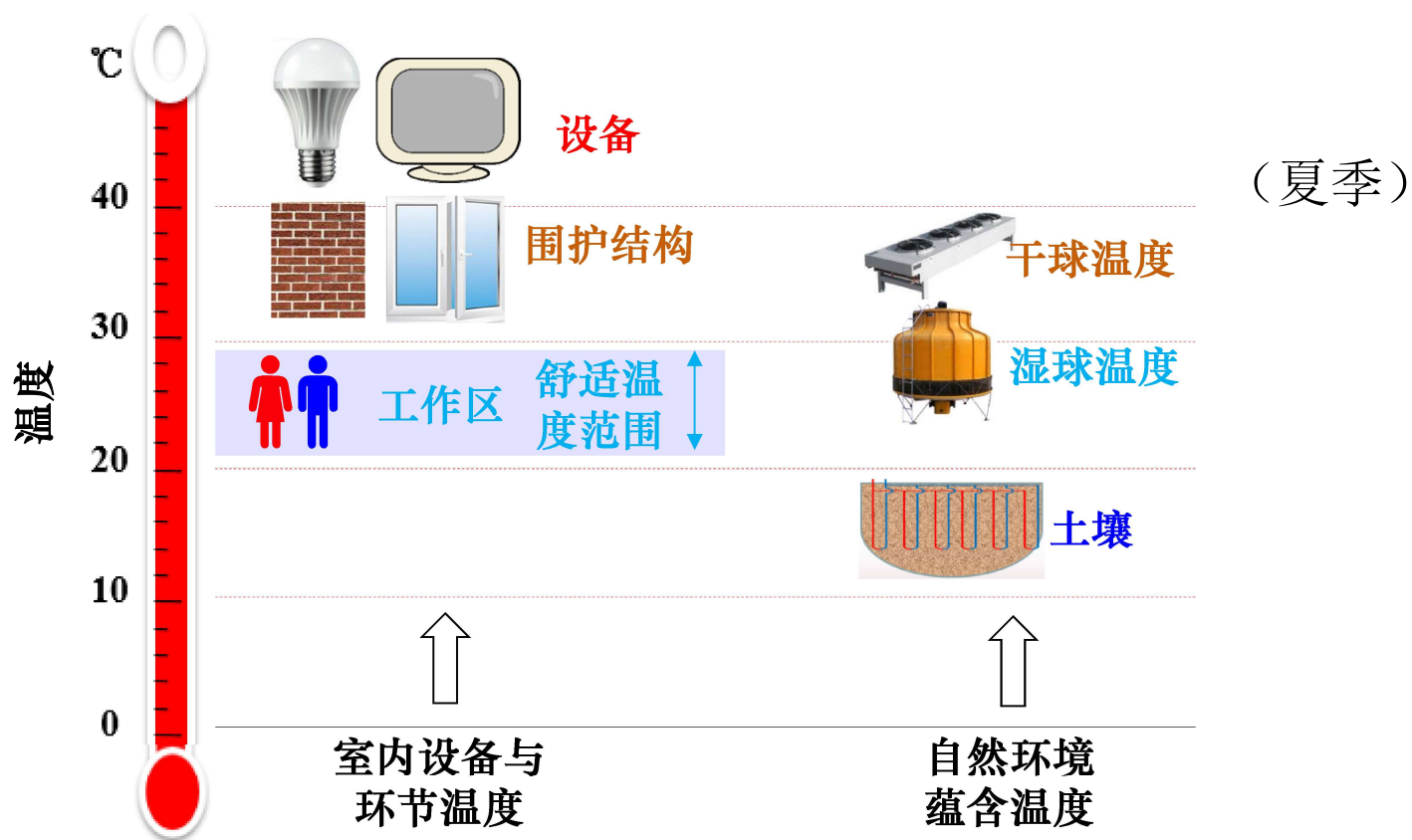
- 分级处理系统能耗表达式：

$$W_g = \frac{Q_{T_{wm1}}}{EER_1} + \frac{Q_{T_{wm2}}}{EER_2} + \dots + \frac{Q_{T_{wmi}}}{EER_i} + \dots + \frac{Q_{T_{wmN}}}{EER_N}$$



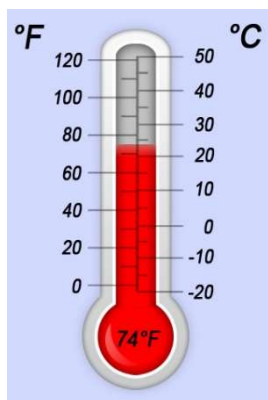
空气分级处理系统原理图

进一步拓展空气处理部位和利用自然能源的思路



- 扩大空气处理范围：室内空气、新风、围护结构和热源区
- 充分利用自然能源和废能：空气、土壤、水体、废热

降低供热和空调能耗的新思路



根据温度，进行负荷分级

Q低品位

- 夏季辐射热源
- 围护结构负荷
- 回风、新风负荷



分级负荷的
处理方法：
利用自然冷热
源直接处理

Q中品位

- 冬季局部
- 室内低温热源
- 中温负荷



利用低温热水/
高温冷水处理

Q高品位

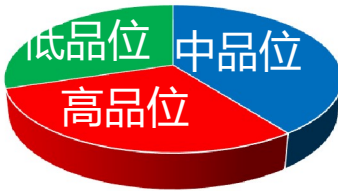
- 工作区
- 特殊环境






传统高温水供
热/低温水供冷

降低供热和空调能耗的新思路

(1) 传统空调


$$\text{供热空调能耗 } E = \frac{\text{低品位} + \text{中品位} + \text{高品位}}{COP_{\text{高品位源}} (\approx 5)}$$

(2) 负荷分级空调系统



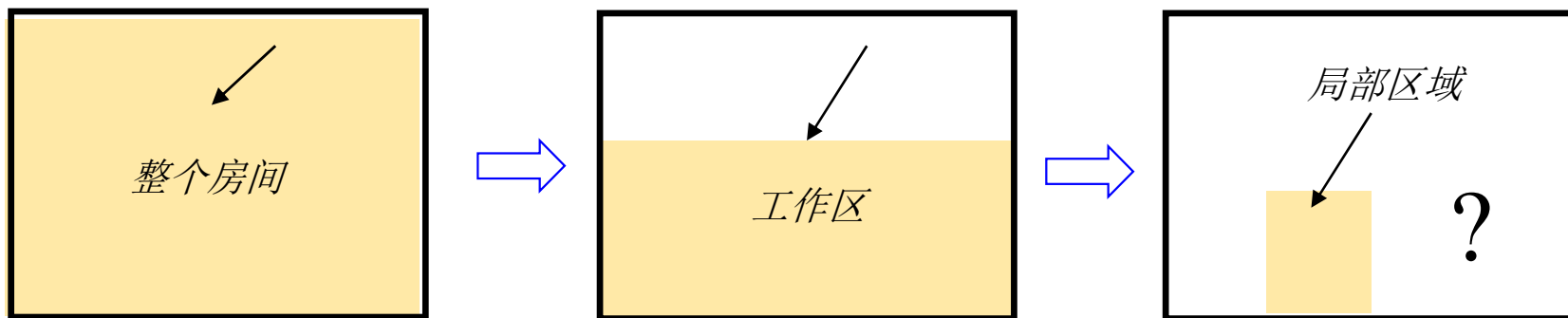
50%

$$\text{供热空调能耗 } E = \frac{\text{高品位}}{COP_{\text{高品位源}} (\approx 5)} + \frac{\text{中品位}}{COP_{\text{中品位源}} (\approx 8)} + \frac{\text{低品位}}{COP_{\text{低品位源}} (\approx 20)}$$

目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

现有非均匀环境研究的不足



- 非均匀环境室内负荷是否一定小于均匀混合时的负荷?
- 非均匀环境系统能耗为何未明显降低?
- 如何进一步节能?
-

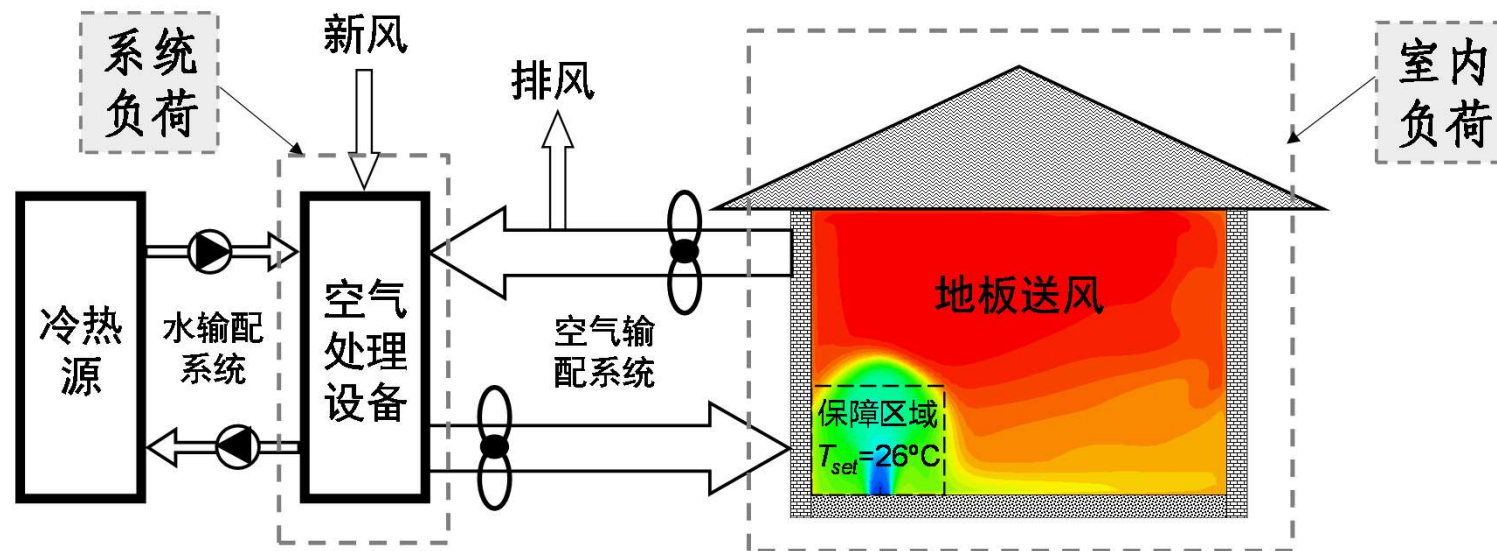


认识非均匀环境规律、发展非均匀室内环境营造理论
对于空调系统节能意义重大!

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

非均匀室内环境营造现有问题

- ☹️ 现有非均匀环境负荷与能耗的认识存在不足甚至错误
- ☹️ 现有非均匀环境空调能耗降低得较小，节能潜力未发挥



- 传统均匀环境营造时，室内参数单一，容易获得（实际也不均匀）
- 非均匀环境营造时，室内参数分布，通常只能依靠CFD方法来获得，但无法掌握其规律

首要任务：揭示非均匀室内环境的参数分布规律！

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

室内参数分布规律：可及度系列指标

送风可及度 $a_S^{n_s, p}(\tau) = \frac{C^p(\tau)}{C^{n_s}}$

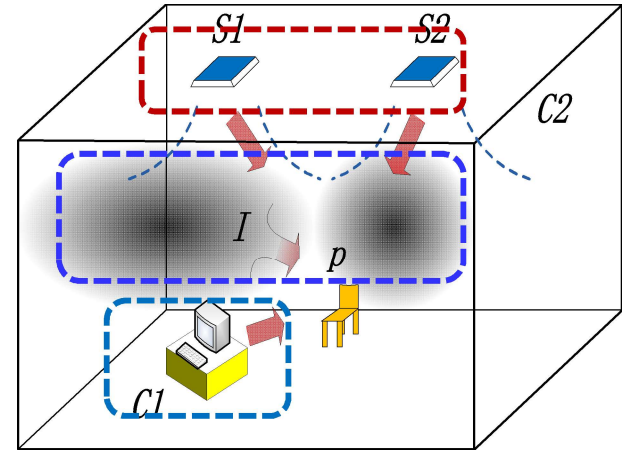
- 描述各个**送风**对室内任意点的瞬时浓度/湿度/温度的影响程度
- 稳态时，各送风可及度之和恒为1
- 仅由室内的气流组织决定

源可及度 $a_C^{n_c, p}(\tau) = \frac{C^p(\tau)}{C_E^{n_c}} \quad C_E^{n_c} = \frac{J^{n_c}}{Q}$

- 描述**污染源/湿源/热源**对室内任意点的瞬时浓度/湿度/温度的影响程度
- 可大于、小于、等于1
- 仅由室内的气流组织和源分布决定

初始条件可及度 $a_I^p(\tau) = \frac{C^p(\tau)}{\bar{C}_0} \quad \bar{C}_0 = \frac{\oint C^p(0)dV}{V}$

- 描述**初始浓度/湿度/温度分布**对室内任意点的瞬时浓度/湿度/温度的影响程度
- 小于等于1，稳态时为0
- 仅由室内的气流组织和初始分布决定



- (1) 室内任意点参数分布主要受**送风、源和初始条件**的影响
- (2) 热源强度不大，室内流场通常可视为固定不变
- (3) **流场固定不变**，能量和组分控制方程为线性方程

$$\frac{\partial \rho C(\tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho U_j C(\tau)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial C(\tau)}{\partial x_j} \right) + S_c(\tau)$$

$$\frac{\partial \rho T(\tau)}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho U_j T(\tau)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial T(\tau)}{\partial x_j} \right) + S_T(\tau)$$

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

室内参数分布规律：预测代数表达式

室内任意点浓度的瞬态分布规律

$$C^p(\tau) = \bar{C}_0 \underbrace{a_I^p(\tau)}_{\text{初始条件可及度}} + \sum_{n_s=1}^{N_s} \left[\underbrace{C_S^{n_s}}_{\text{送风可及度}} \underbrace{a_S^{n_s,p}(\tau)}_{\text{送风可及度}} \right] + \sum_{n_c=1}^{N_c} \left[\frac{J^{n_c}}{Q} \underbrace{a_C^{n_c,p}(\tau)}_{\text{污染源可及度}} \right]$$

室内任意点湿度的瞬态分布规律

$$d^p(\tau) = \bar{d}_0 \cdot \underbrace{a_I^p(\tau)}_{\text{初始条件可及度}} + \sum_{n_s=1}^{N_s} \left[\underbrace{d^{n_s}}_{\text{送风可及度}} \underbrace{a_S^{n_s,p}(\tau)}_{\text{送风可及度}} \right] + \sum_{n_c=1}^{N_c} \left[\frac{J_d^{n_c}}{Q} \underbrace{a_C^{n_c,p}(\tau)}_{\text{湿源可及度}} \right]$$

室内任意点温度的瞬态分布规律

$$\theta^p(\tau) = \bar{\theta}_0 \underbrace{a_{\theta,I}^p(\tau)}_{\text{初始条件可及度}} + \sum_{n_s=1}^{N_s} \left[\underbrace{\theta_S^{n_s}}_{\text{送风可及度}} \underbrace{a_{\theta,S}^{n_s,p}(\tau)}_{\text{送风可及度}} \right] + \sum_{n_c=1}^{N_c} \left[\frac{q^{n_c}}{\rho C_p Q} \underbrace{a_{\theta,C}^{n_c,p}(\tau)}_{\text{热源可及度}} \right]$$

揭示出各因素对室内参数分布的影响规律，为非均匀室内环境营造奠定基础

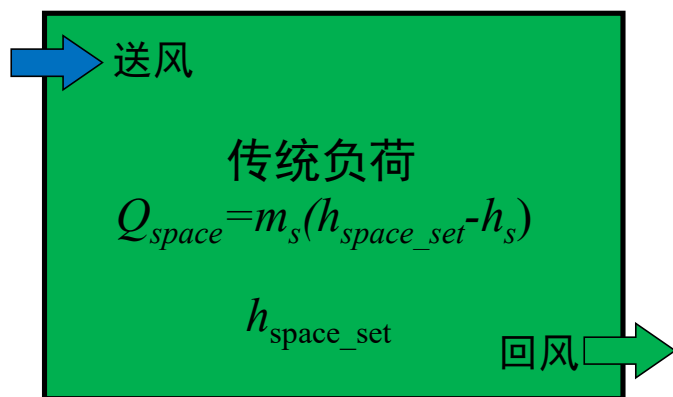
非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

空调负荷构成与规律：局部负荷

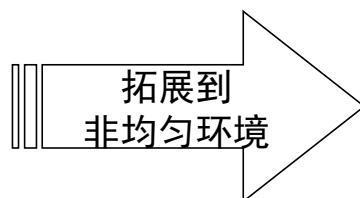
局部负荷的定义

若只考虑显热：
$$Q_{local} = mc_p (T_{local_set} - T_{supply})$$

$$Q_{space} = m(h_{space_set} - h_{supply})$$



均匀环境与室内负荷



$$Q_{local} = m(h_{local_set} - h_{supply})$$



非均匀环境与局部负荷

局部负荷的解析表达式（以显热负荷为例）

“硬” 热源（太阳辐射、灯光、人员、设备等热源）

“软” 热源（围护结构传热等）

$$Q_{local} = -mc_p \theta_S = \sum_{j=1}^{N_C} \left[q_{Cj} \bar{A}_{Cj,local} \right] + \sum_{k=1}^{N_{CW}} \left[K_{CWk} F_{CWk} (T_{out} - T_{in,CWk}) \bar{A}_{CWk,local} \right]$$

“硬” 热源对保障区域的可及度

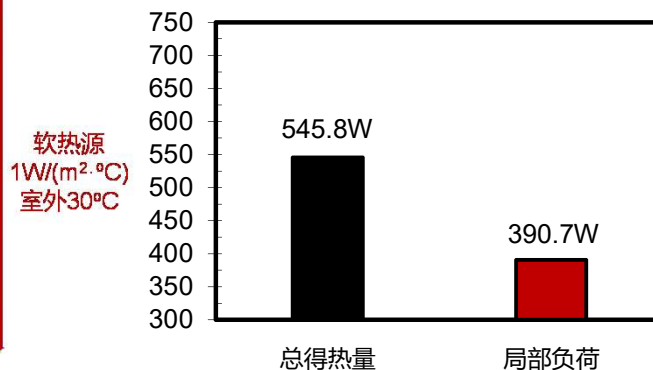
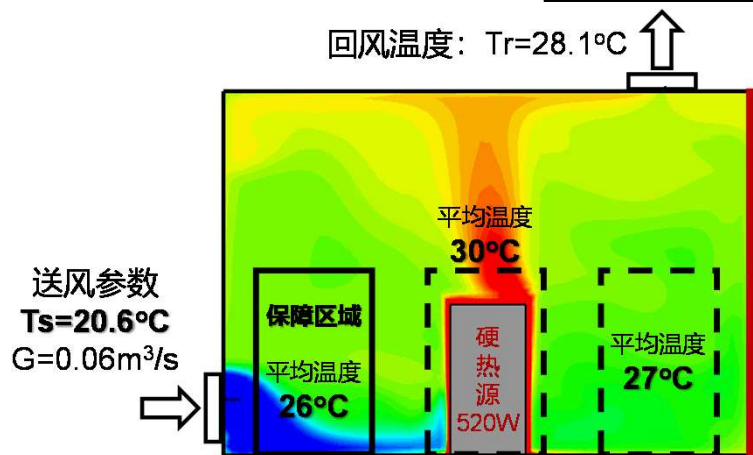
“软” 热源对保障区域的可及度

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

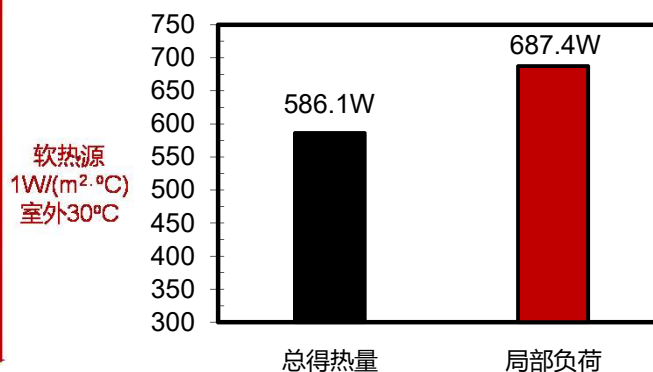
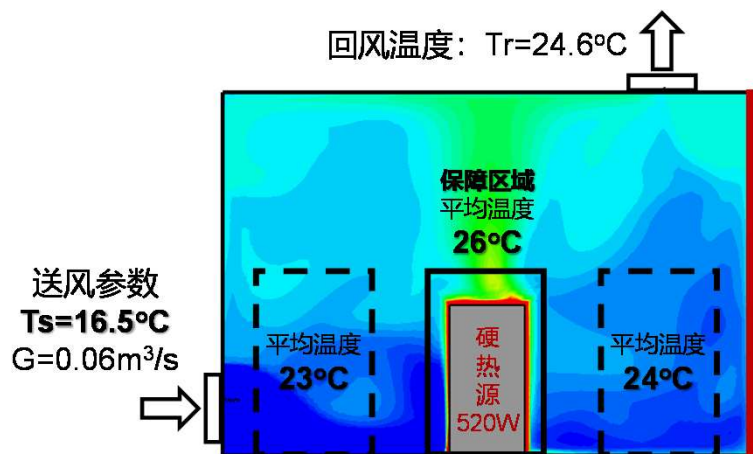
空调负荷构成与规律：局部负荷

局部负荷示例

$$Q_{local} = -mc_p \theta_S = \sum_{j=1}^{N_C} [q_{Cj} \bar{A}_{Cj,local}] + \sum_{k=1}^{N_{CW}} [K_{CWk} F_{CWk} (T_{out} - T_{in,CWk}) \bar{A}_{CWk,local}]$$



软热源: 25.8W
热源可及度: 0.7



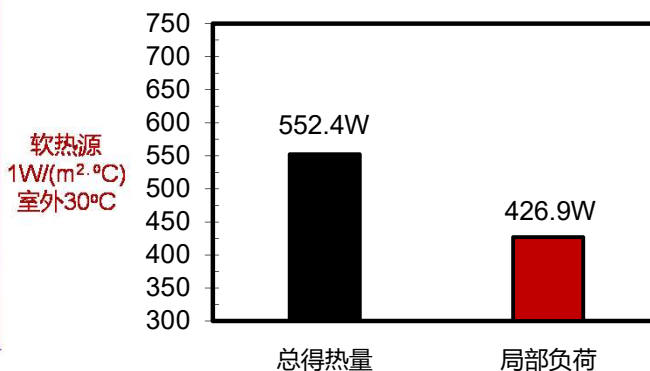
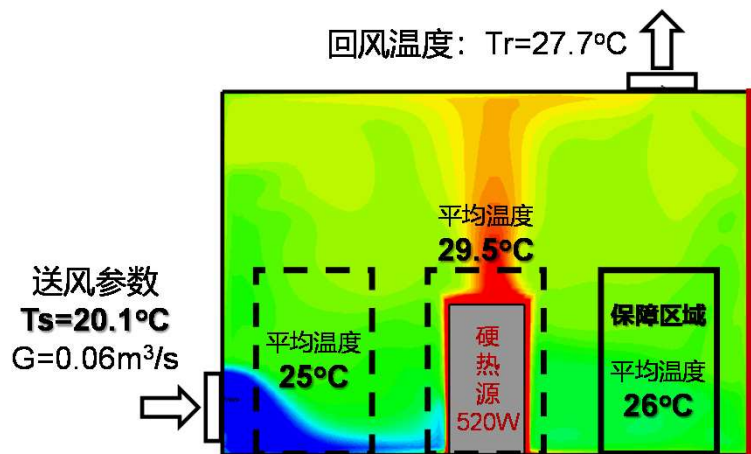
软热源: 66.1W
热源可及度: 1.2

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

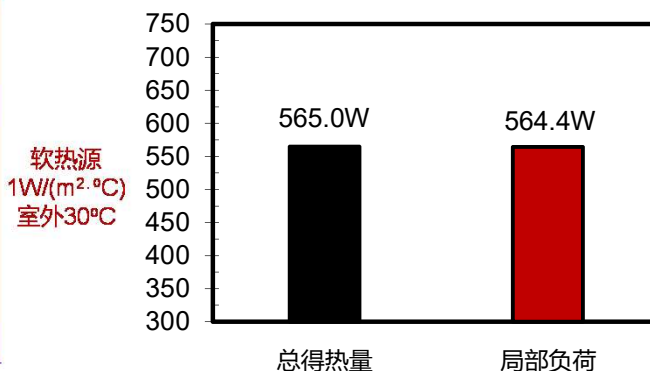
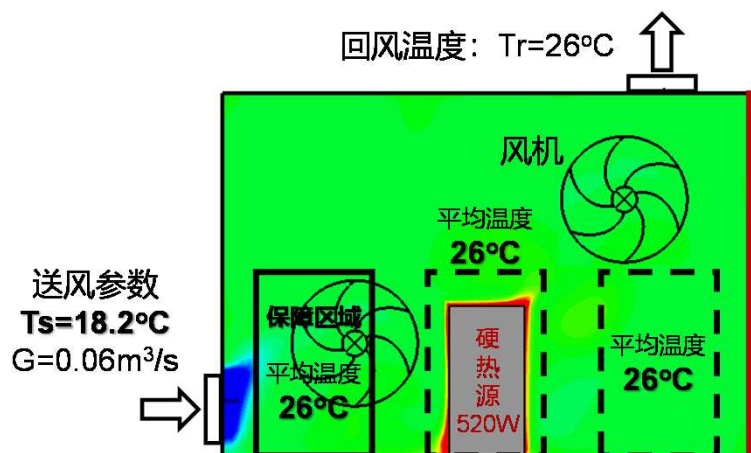
空调负荷构成与规律：局部负荷

局部负荷示例

$$Q_{local} = -mc_p \theta_S = \sum_{j=1}^{N_C} [q_{Cj} \bar{A}_{Cj,local}] + \sum_{k=1}^{N_{CW}} [K_{CWk} F_{CWk} (T_{out} - T_{in,CWk}) \bar{A}_{CWk,local}]$$



软热源: 32.4W
热源可及度: 0.8



软热源: 48.5W
热源可及度: 1.0

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

空调负荷构成与规律：局部负荷

局部负荷表达式的意义

$$Q_{local} = -mc_p \theta_S = q_C \bar{A}_{C,local}$$

$$Q_{local} = -mc_p \theta_S = \sum_{j=1}^{N_C} \left[q_{Cj} \bar{A}_{Cj,local} \right] + \sum_{k=1}^{N_{CW}} \left[K_{CWk} F_{CWk} (T_{out} - T_{in,CWk}) \bar{A}_{CWk,local} \right]$$

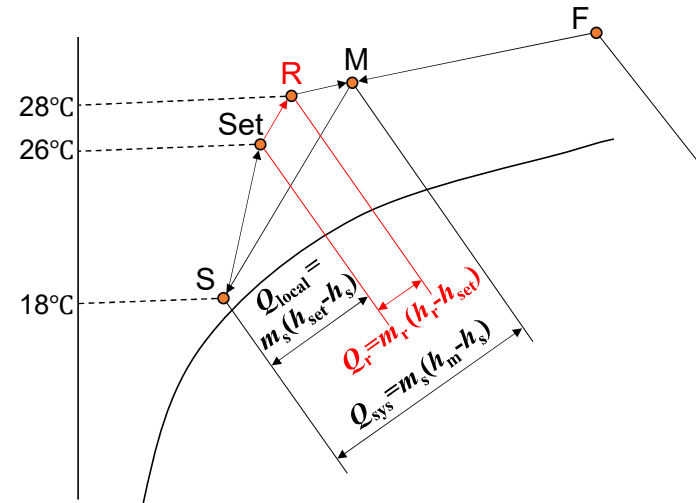
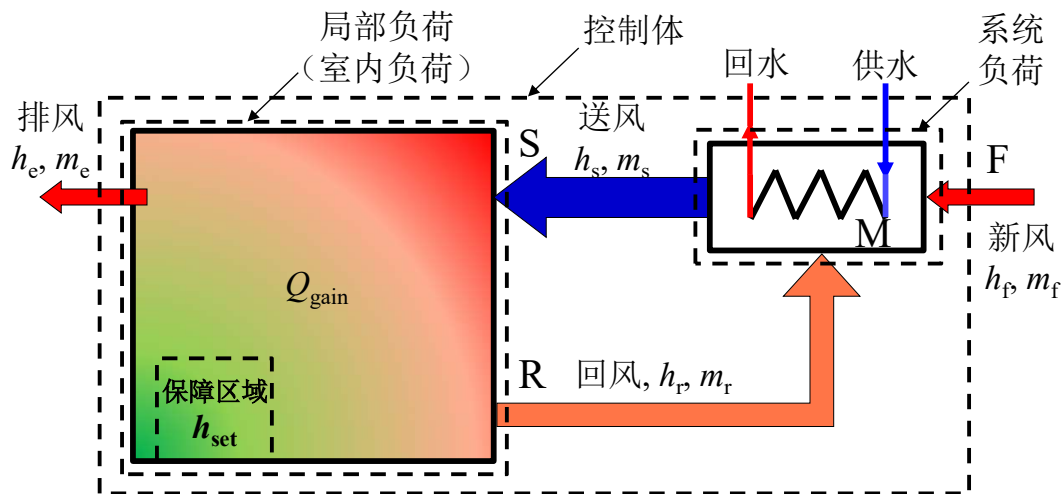
- 非均匀环境局部负荷可以**大于**、小于或等于传统均匀环境的室内负荷（或总得热量），打破了现有室内负荷不可能大于总得热量的认识误区
- 当热源强度不变时，**热源可及度**决定了局部负荷的大小，从而揭示了室内负荷的**形成机理**和**影响规律**
- 通过优化室内**气流组织**、**热源分布**和**保障区域**等可有效降低局部负荷大小

但非均匀环境局部负荷的降低
是否一定意味着其系统负荷的降低？

非均匀室内环境空调负荷与能耗理论

空调能耗构成与规律：系统负荷

系统负荷的构成

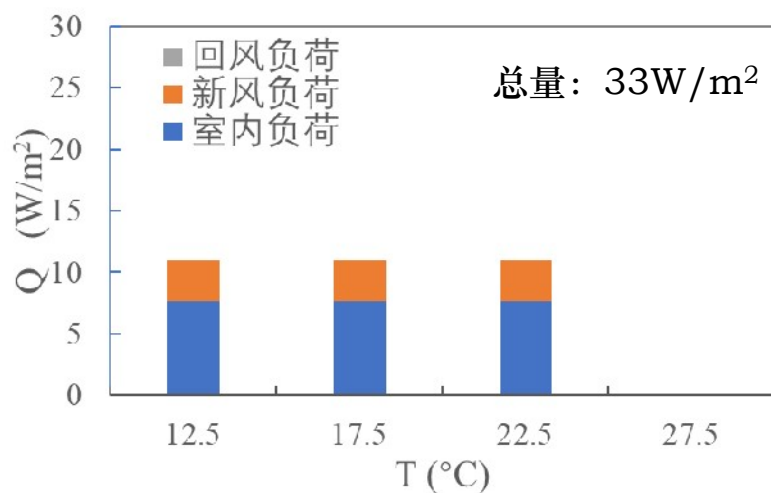


- 系统负荷 $Q_{sys} = m_s(h_{set} - h_s) + m_f(h_f - h_{set}) + m_r(h_r - h_{set}) = Q_{local} + Q_{fresh} + Q_{return}$
- 回风负荷 $Q_{return} = m_r(h_r - h_{set})$
- 回风负荷的解析表达式

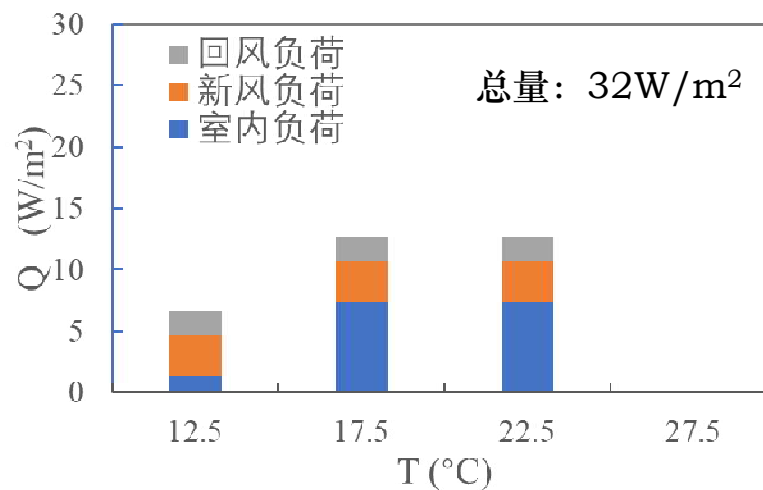
$$Q_{return} = m_R c_p \theta_R = \frac{m_R}{m} \left(\sum_{j=1}^{N_C} [q_{Cj} (1 - \bar{A}_{Cj,local})] + \sum_{k=1}^{N_{CWk}} [K_{CWk} F_{CWk} (T_{out} - T_{in,CWk}) (1 - \bar{A}_{CWk,local})] \right)$$

高效气流组织对系统负荷影响

- 高效气流组织可实现负荷品位转移，但系统负荷数量改变很少



混合通风



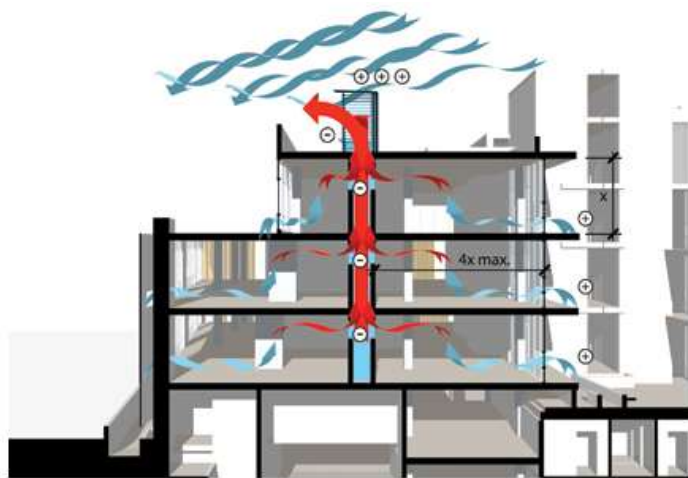
高效气流组织

- 采用高效气流组织后，室内负荷可显著降低，但当存在回风时，系统负荷数量改变很小
- 高效气流组织实际上改变了负荷品位，将高品位负荷转移至低品位，为低品位能源利用提供可能
- 但若仍采用传统冷热源，则系统并无太多节能

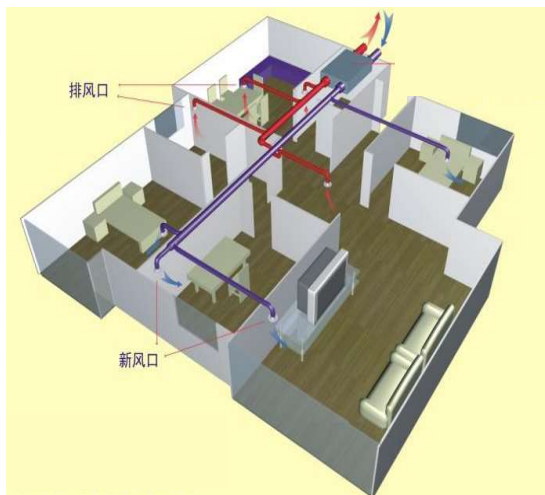
目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

直接利用空气干球温度通风降温



自然通风



机械通风



混合通风

- 1) 自然通风是免费能源，对建筑的开口，体型、布局等设计要求较高
- 2) 通风效果受通风量和通风温度影响，不同地区的通风效果不相同
- 3) 从舒适度的要求来看，扩展热舒适标准时，通风的保障时间能够进一步延长，当对热舒适标准要求较高时，通风的保障时间会大大缩短



利用浅层地热能对新风进行预冷/预热

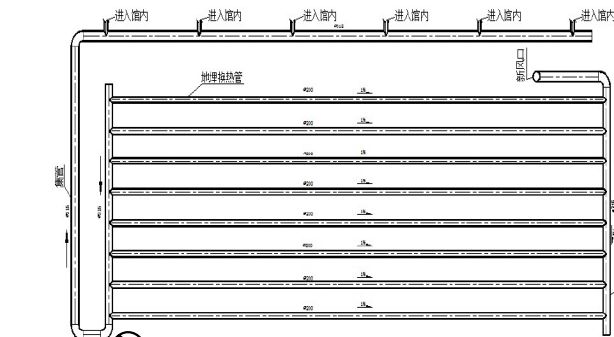
主要有以下三种形式:

地道风



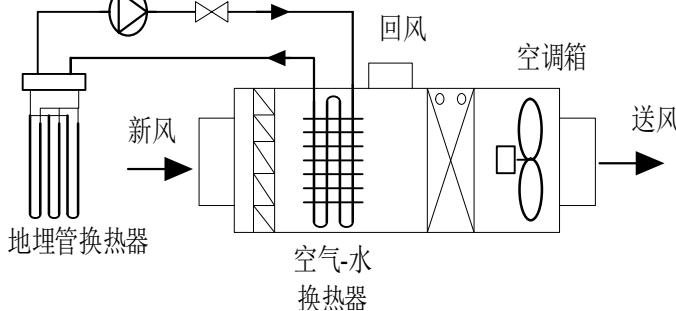
- 六、七十年代利用闲置的人防地道
- 系统简单、充分利用浅表层地热能
- 地道表面结露、霉菌等
- 大多用于建筑直接通风降温

地埋风管



- 直接将风管道于地下，埋深 5~10m
- 地道复杂，初投资大，风机能耗高
- 风管内表面结露、霉菌等

地埋管新风新风处理[1]



- 结合地道风的优点和不足，采用地埋管采集冷热水与空调箱相结合的新风预处理系统[1]
- 高效利用浅层地热能，降低霉菌风险，降低投资

[1] Weihua Lyu, **Xianting Li***, et al. *Energy and Buildings*. 2019, 185:39-48.



利用干空气能的蒸发冷却冷风/冷水技术

蒸发冷却冷风



直接蒸发冷却器



间接蒸发冷却器
湿球效率小于1



露点间接蒸发冷却器
湿球效率可大于1



复合蒸发冷却空调机组

蒸发冷却冷水



喷水室



蒸发冷却冷水机组

- 在气候干燥地区能取代传统空调使用
- 与机械冷源相结合，降低机械冷源系统容量，节约运行费用
- 提高机械冷源效率



采集合适温度的冷/热水对室内供冷/热

空气干球温度



空气-水换热器

空气湿球温度



冷却塔



江河湖海



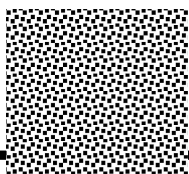
水-水换热器



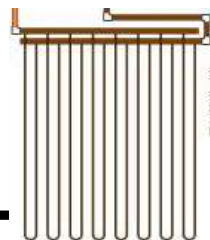
太阳



太阳能集热器



土壤



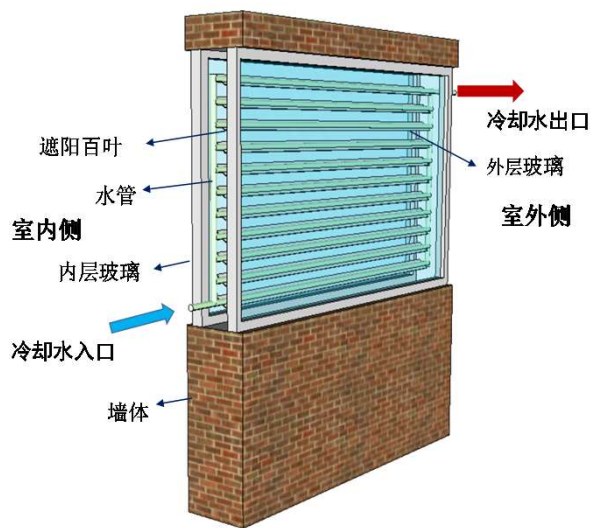
地埋管换热器

采集装置与室内末端相结合

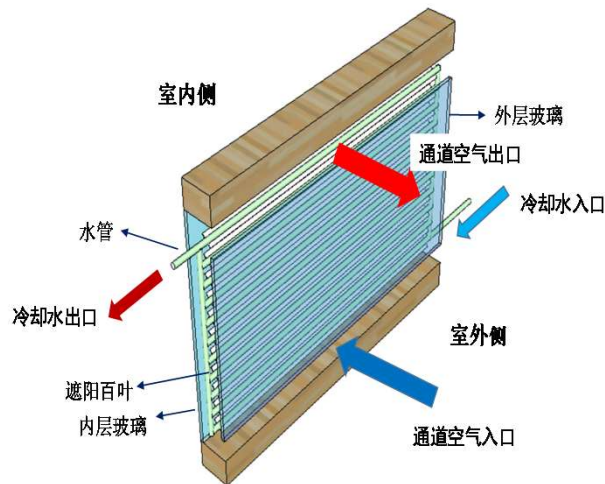
- 风机盘管
- 地板辐射
- 散热器



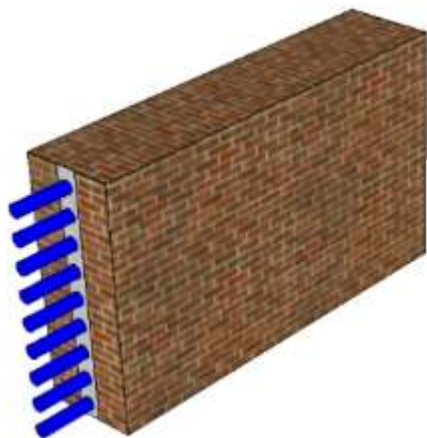
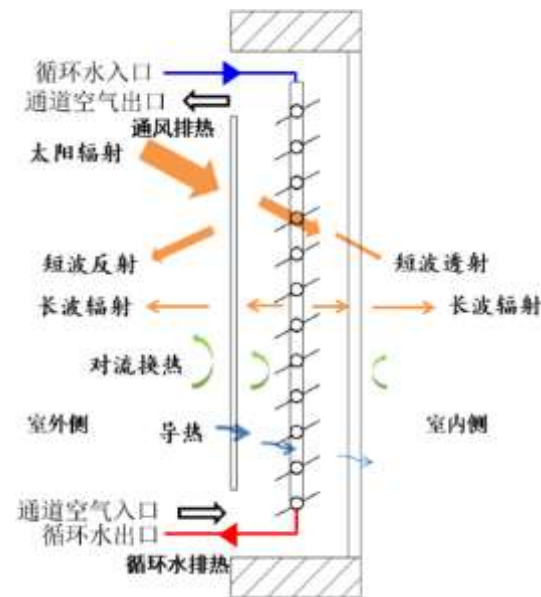
利用自然能源处理围护结构负荷技术



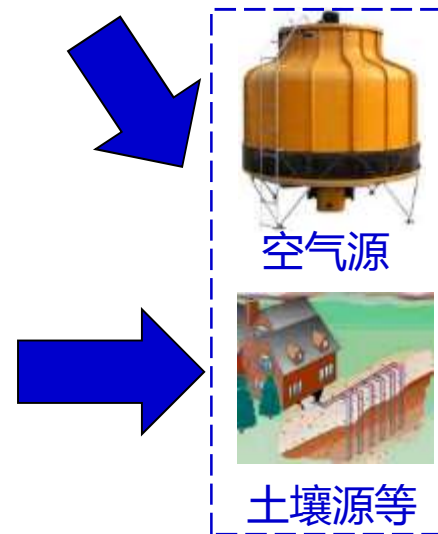
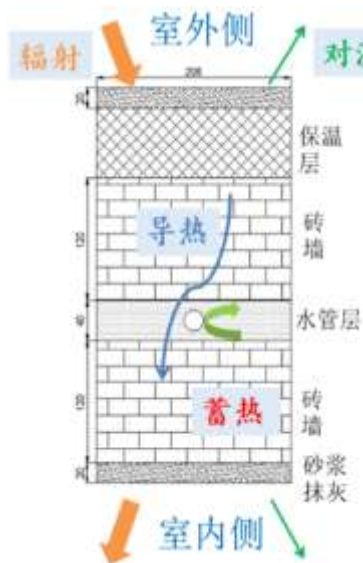
嵌管式窗户



嵌管式双层皮幕墙



嵌管式墙体

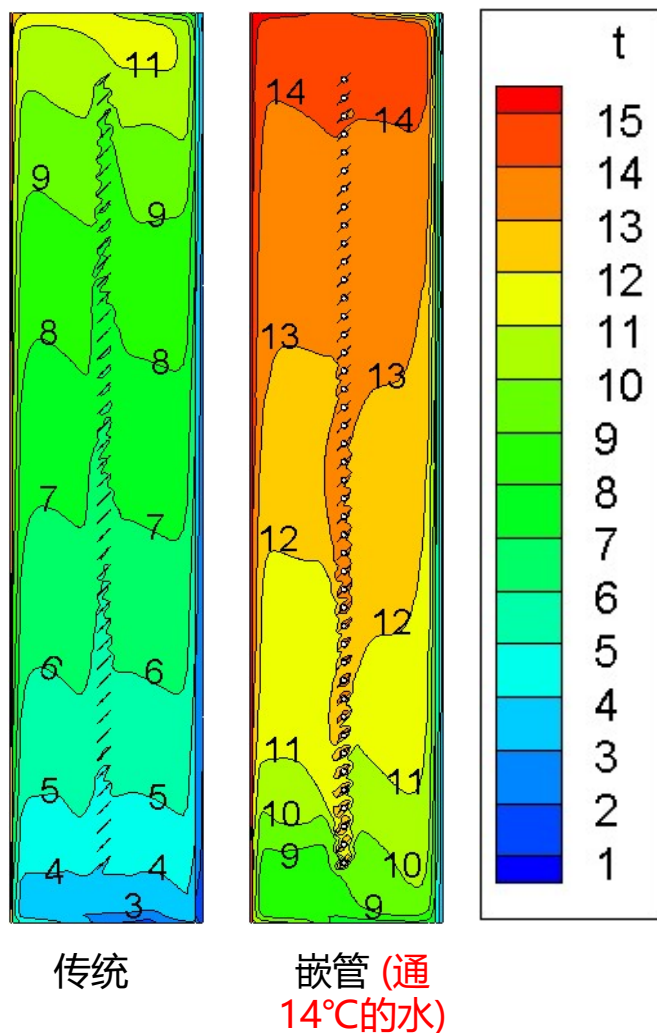


与低品位能源结合 34

自然及低品位能源的直接利用---围护结构

1) 降低玻璃围护结构负荷-冬季

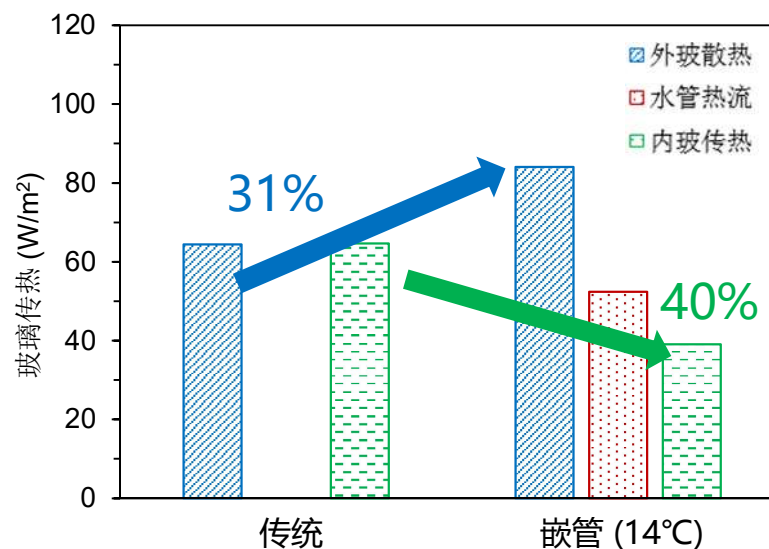
利用低于室温的水进行辅助供热



条件设置:

室外温度 0°C

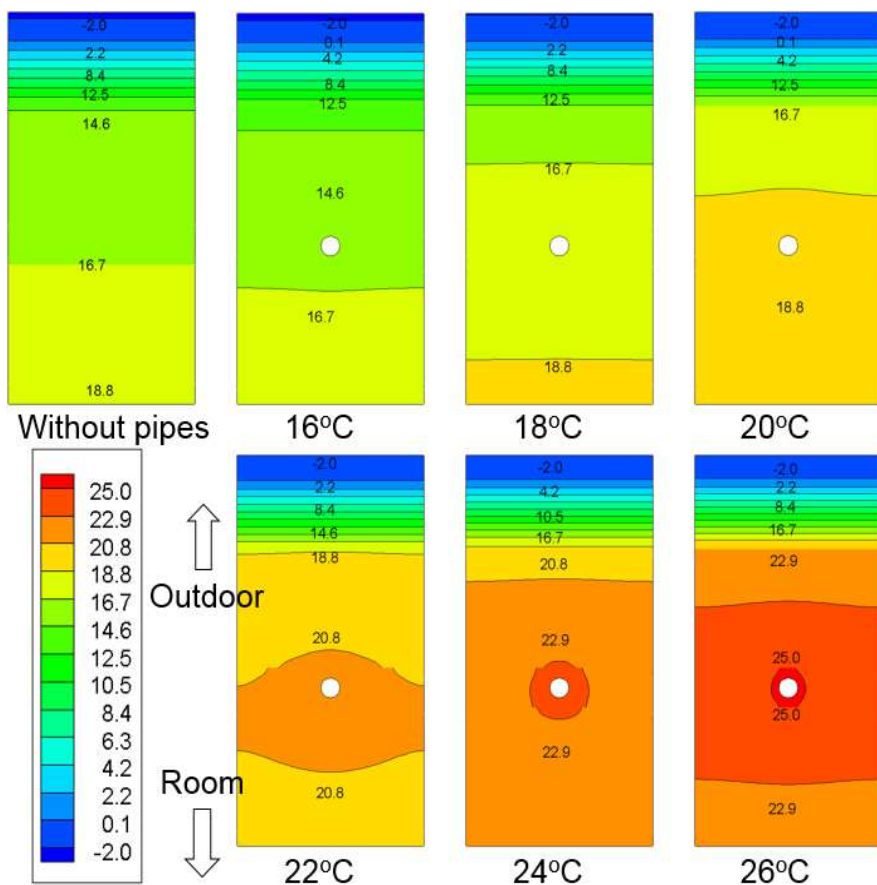
室温 20°C



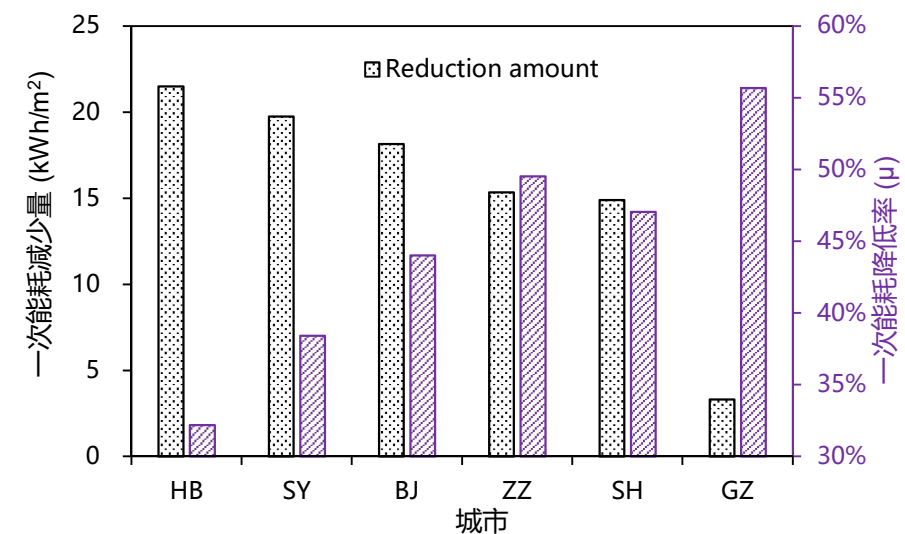
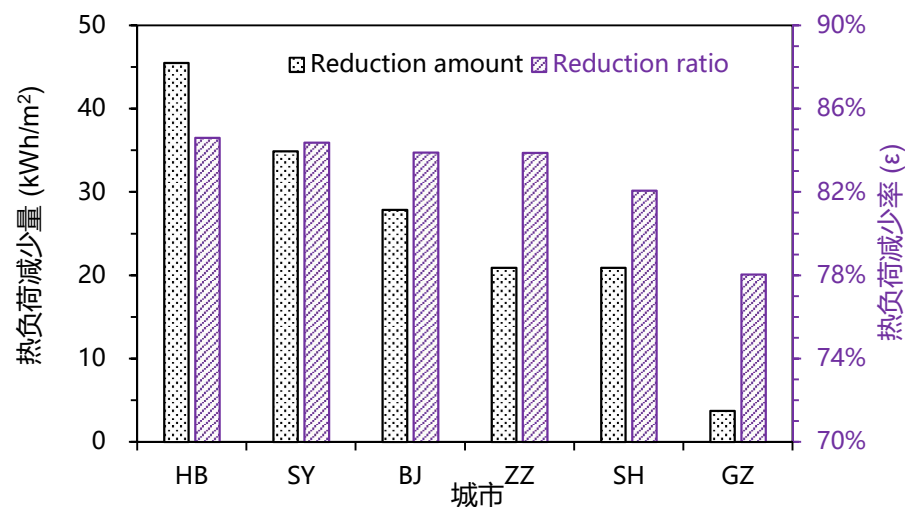
- ✓ 加热玻璃腔体时，外玻的散热量增大，内玻的传热量减少
- ✓ 因为制取低温热水的代价小，所以总体节能率在20%以上

自然及低品位能源的直接利用---围护结构

2) 降低墙体围护结构负荷-冬季



不同供水温度下的温度场
外温-2.8°C, 室温20°C



利用ASHP生产低温热水在不同城市的效果^[1]

主要自然能源利用方式按位置分类

生产低品位冷/热风、低品位冷/热水

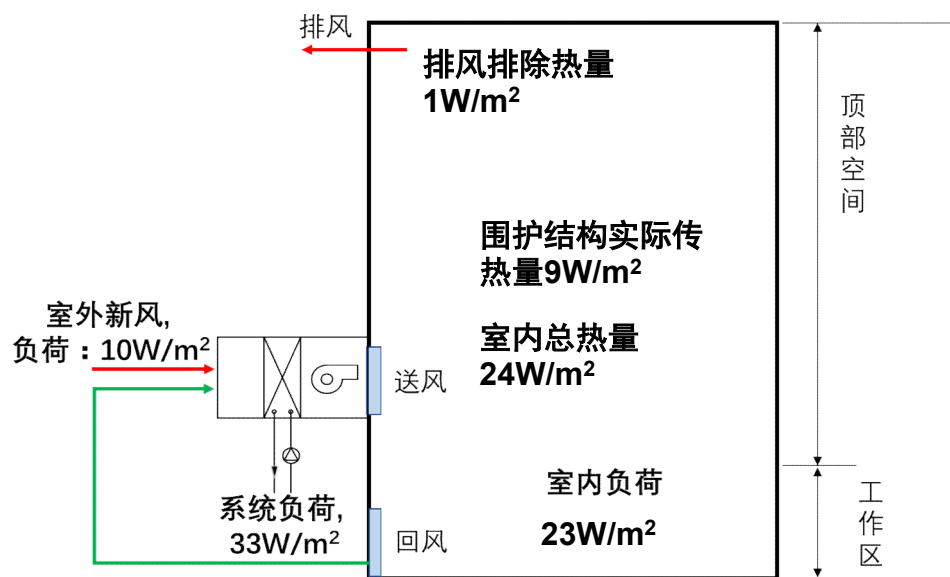
室内冷却	预冷/预热新风	冷却/加热围护结构
➤ 自然通风、机械通风	➤ 蒸发冷却处理新风	➤ 双层皮玻璃幕墙
➤ 直接/间接蒸发冷却通风	➤ 地道风	➤ 嵌管围护结构结合冷却塔
➤ 冷却塔免费供冷	➤ 土壤新风系统	➤ 嵌管围护结构结合地埋管
➤ 地埋管免费供冷	➤ 地埋管新风处理	



以高大空间一次回风空调系统4个方案进行对比

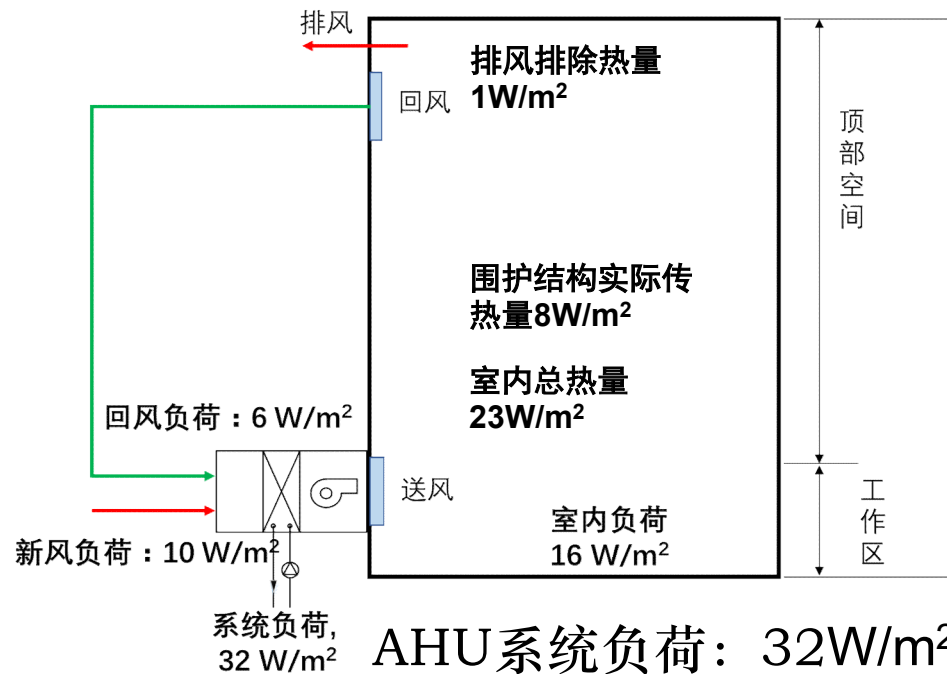
✓ 已知室内发热量 $15\text{W}/\text{m}^2$ ，围护结构设计传热量 $10\text{W}/\text{m}^2$ ，新风负荷为 $10\text{W}/\text{m}^2$

方案1：中送风+底部回风



AHU系统负荷： $33\text{W}/\text{m}^2$

方案2：底部送风+顶部回风

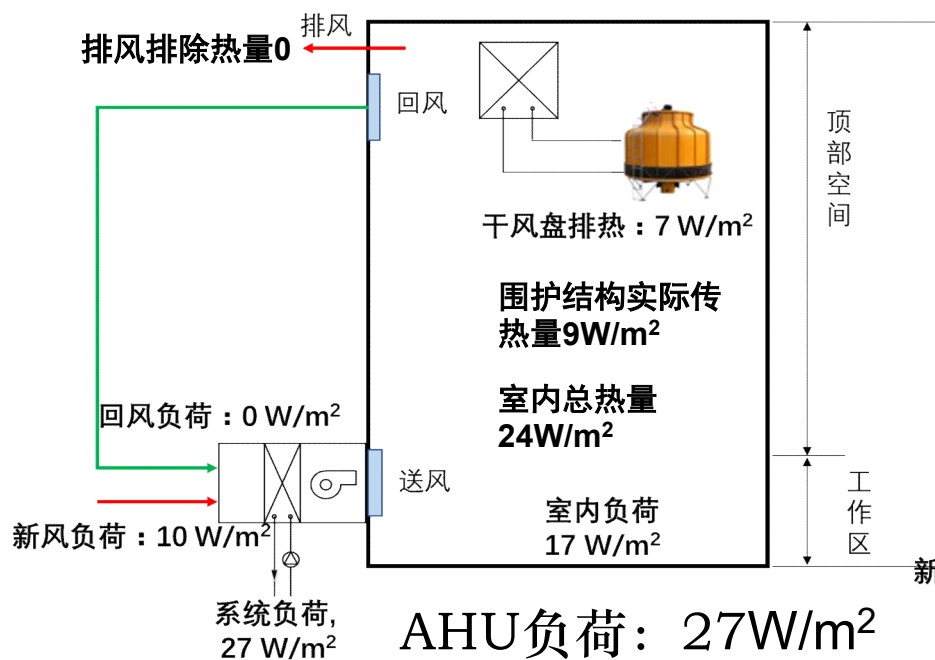


AHU系统负荷： $32\text{W}/\text{m}^2$

以高大空间一次回风空调系统4个方案进行对比

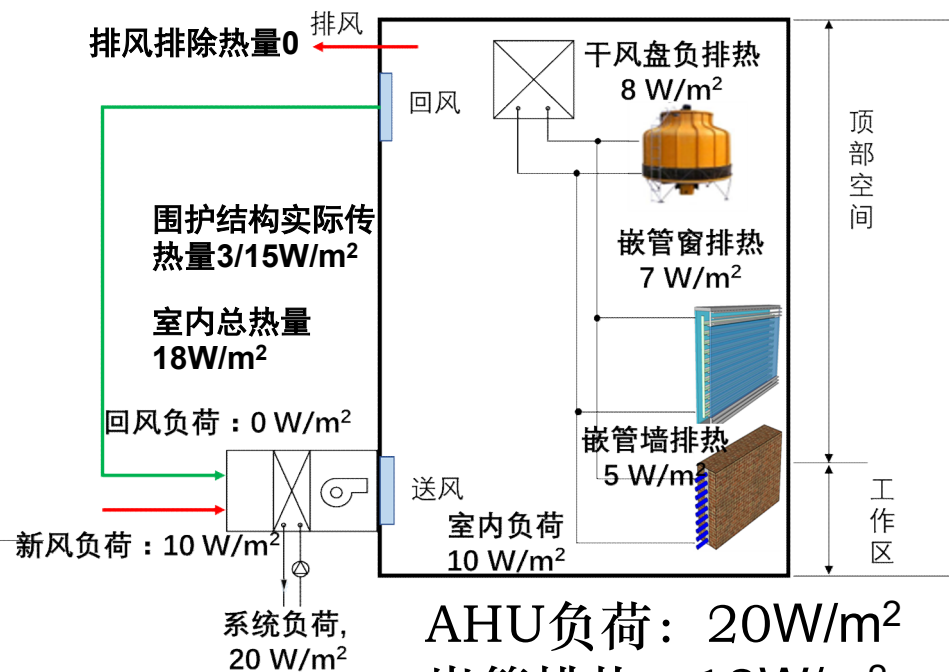
✓ 已知室内发热量 15W/m^2 ，围护结构设计传热量 10W/m^2 ，新风负荷为 10W/m^2

方案3：底部送风+顶部回风+顶部干风盘



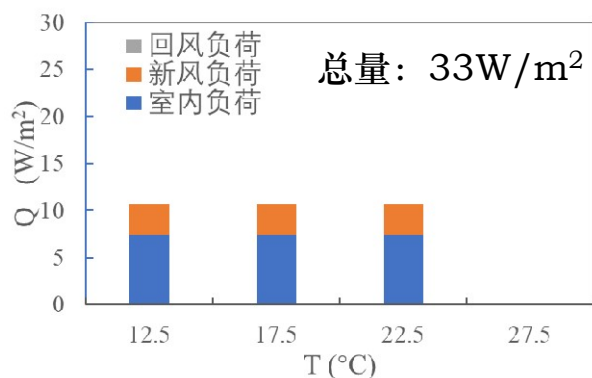
AHU负荷： 27W/m^2
干风盘排热： 7W/m^2

方案4：底部送风+顶部回风+顶部干风盘
+嵌管围护结构

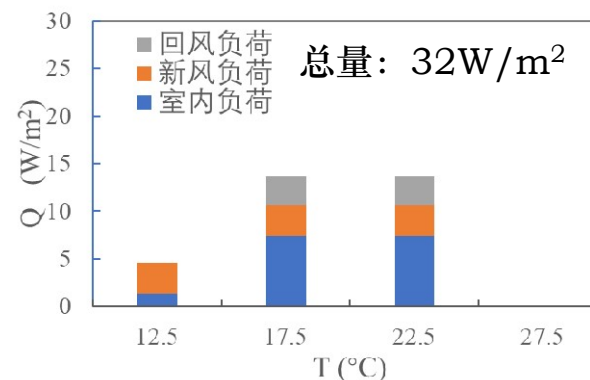


AHU负荷： 20W/m^2
嵌管排热： 12W/m^2
干风盘排热： 8W/m^2

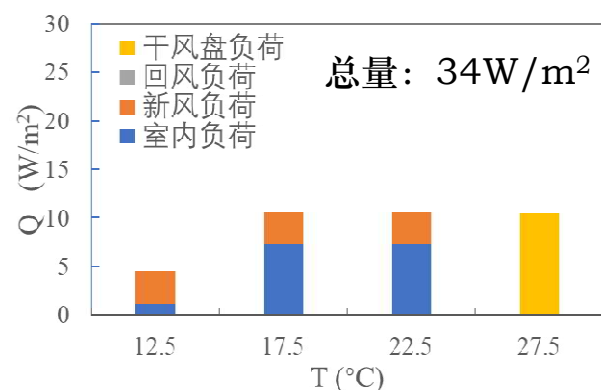
前述高大空间案例的负荷数量与品位分布图



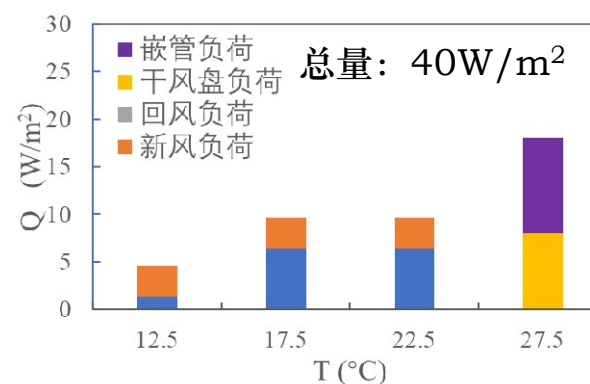
方案1：中送风+底部回风



方案2：底部送风+顶部回风



方案3：底部送风+顶部回风+顶部干风盘



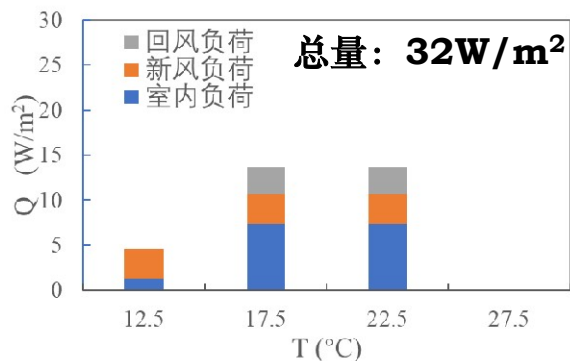
方案4：底部送风+顶部回风+顶部干风盘+嵌管围护结构

同一对象，不同气流组织、不同的室内末端和围护结构方案，空调负荷的数量和品位均不一样；通过自然能源处理部分负荷后，可显著降低传统品位负荷的数量

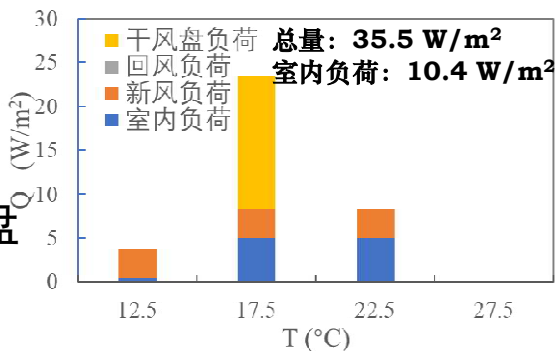
采用新型末端和围护结构对负荷数量及品位的影响

➤ 采用新型室内末端，可实现负荷品位的转移

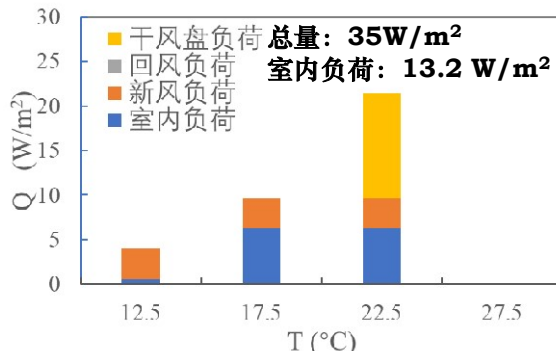
末端组合1：
单一送风末端



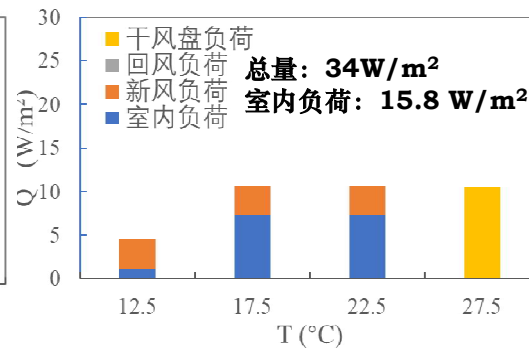
末端组合2：
送风末端
+顶部干风盘



干风盘水温17.5°C



干风盘水温22.5°C



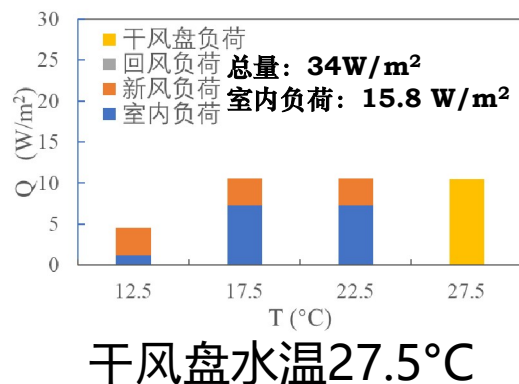
干风盘水温27.5°C

- 顶部采用自然能源干风盘后，传统空调系统负荷转移至更低品位
- 采用不同温度自然能源，转移的负荷数量会有显著不同

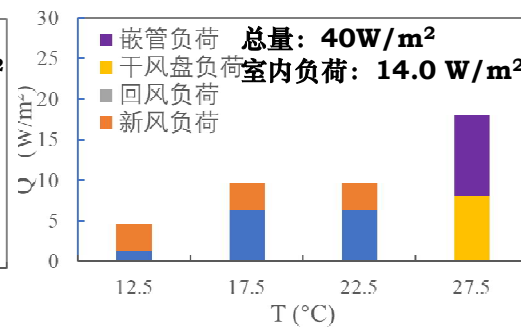
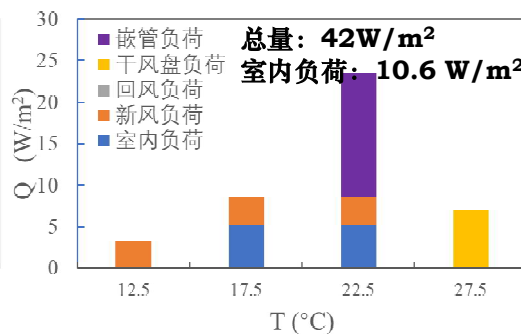
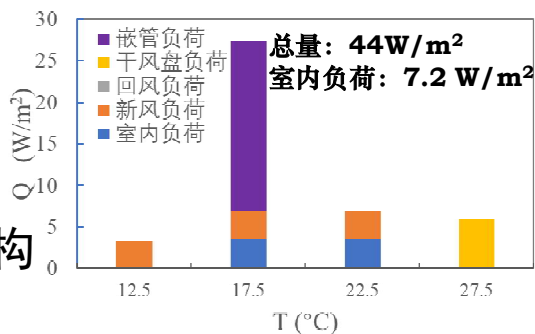
采用新型末端和围护结构对负荷数量及品位的影响

➤ 采用自然能源围护结构，可更大程度实现负荷数量和品位转移

末端组合2：
送风末端
+顶部干风盘



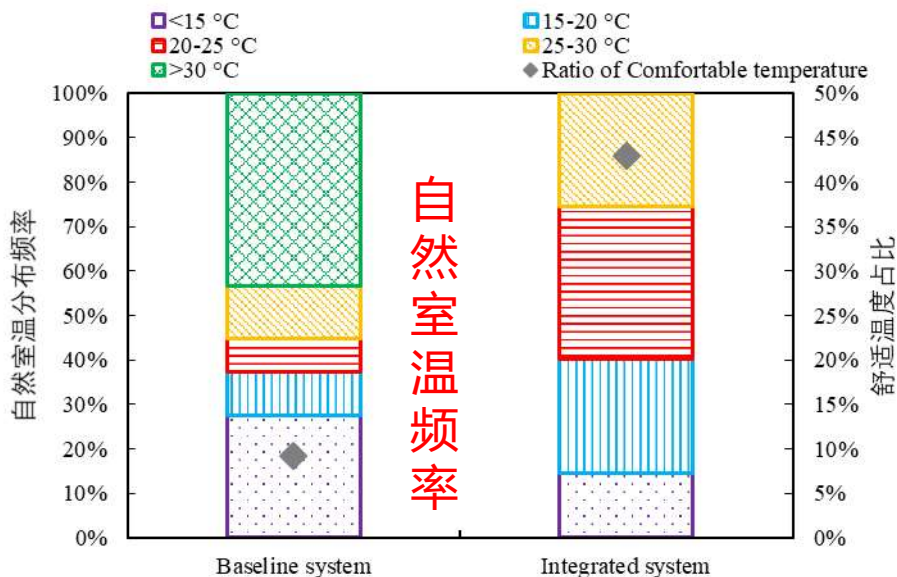
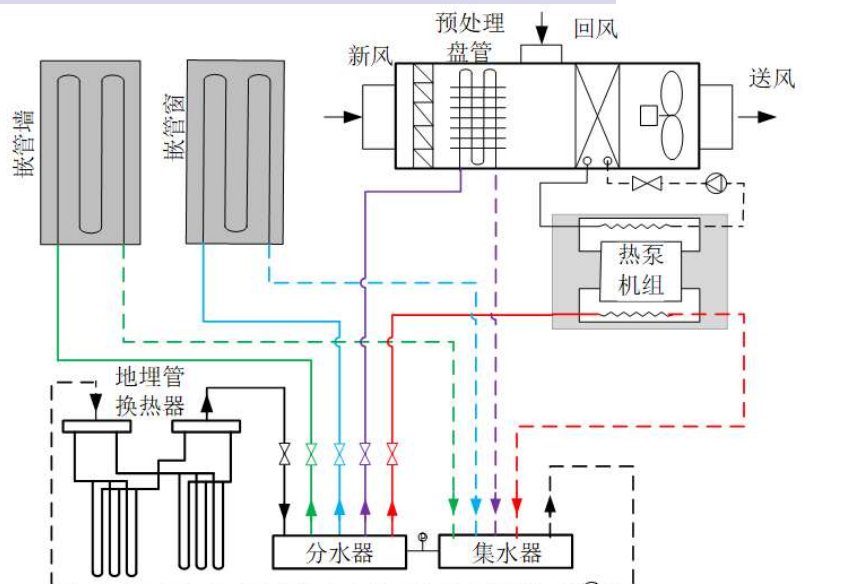
末端组合3：
送风末端
+顶部干风盘
+嵌管式围护结构



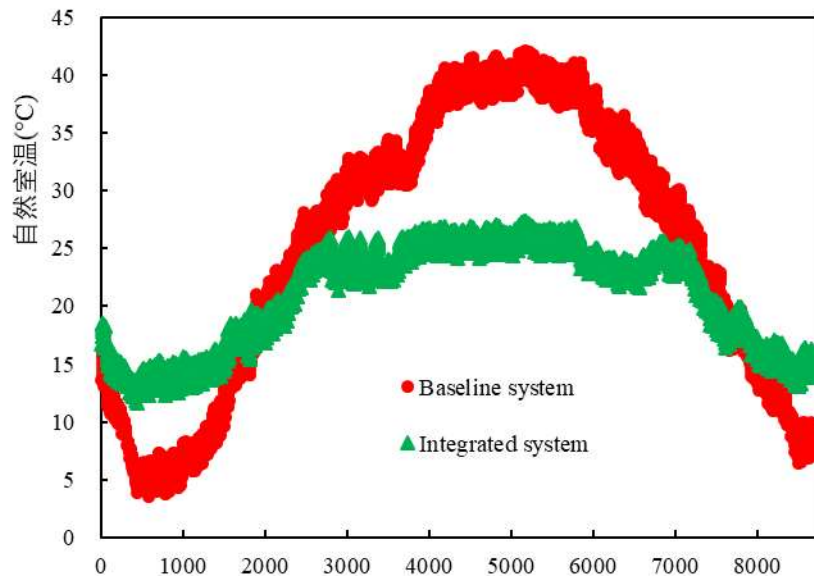
- 采用管式围护结构后，部分空调系统负荷及干风盘负荷转移至嵌管式围护结构
- 嵌管围护结构采用不同温度水时，转移的负荷数量和品位均不同，且嵌管处水温较低时，总负荷数量增加显著（部分热量散失到室外环境）

自然及低品位能源的直接利用---联合应用

最长非空调供暖时间



营造更舒适的室温



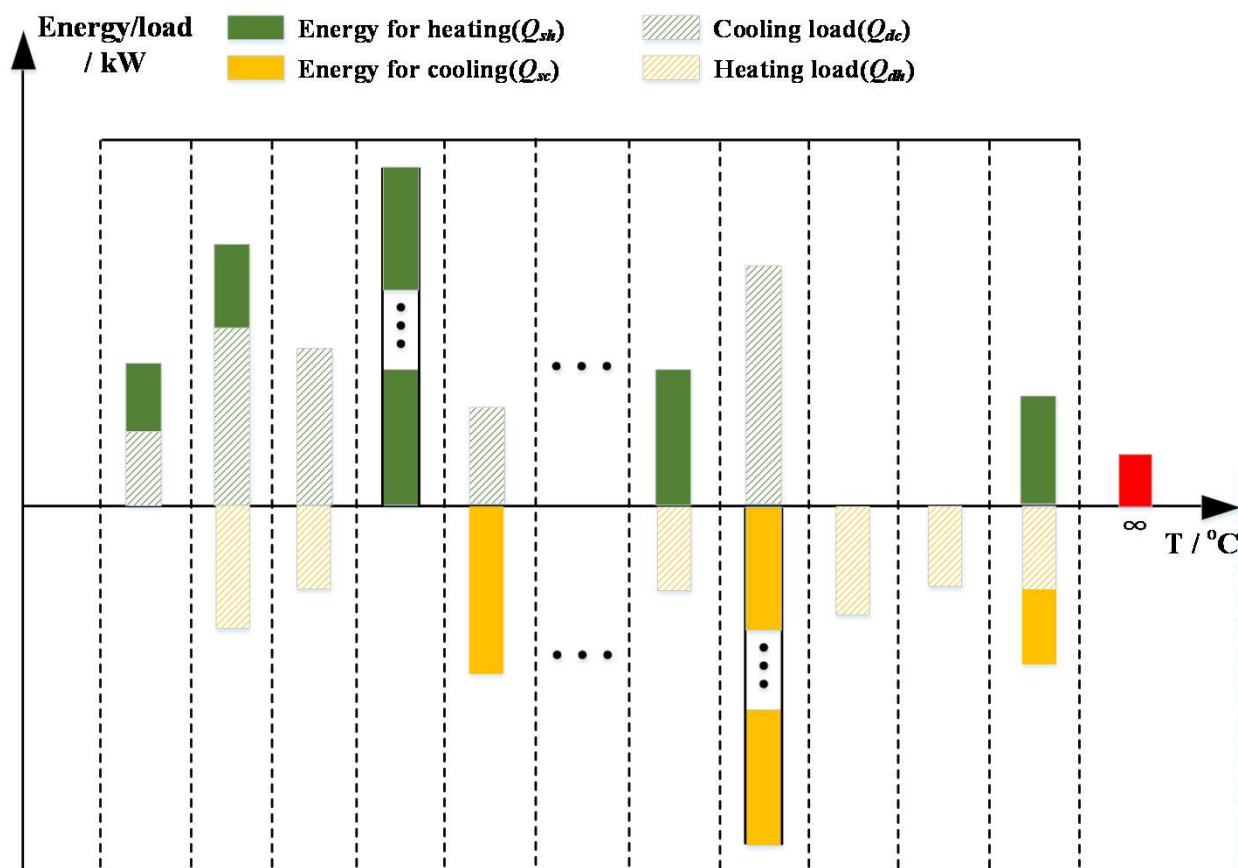
房间自然室温分布 (上海)

- ✓ 房间温度小于 15°C 的时间大大降低
- ✓ 房间温度全年均低于 30°C ，大大缩短冷机运行的时间

目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

空气处理流程构建方法

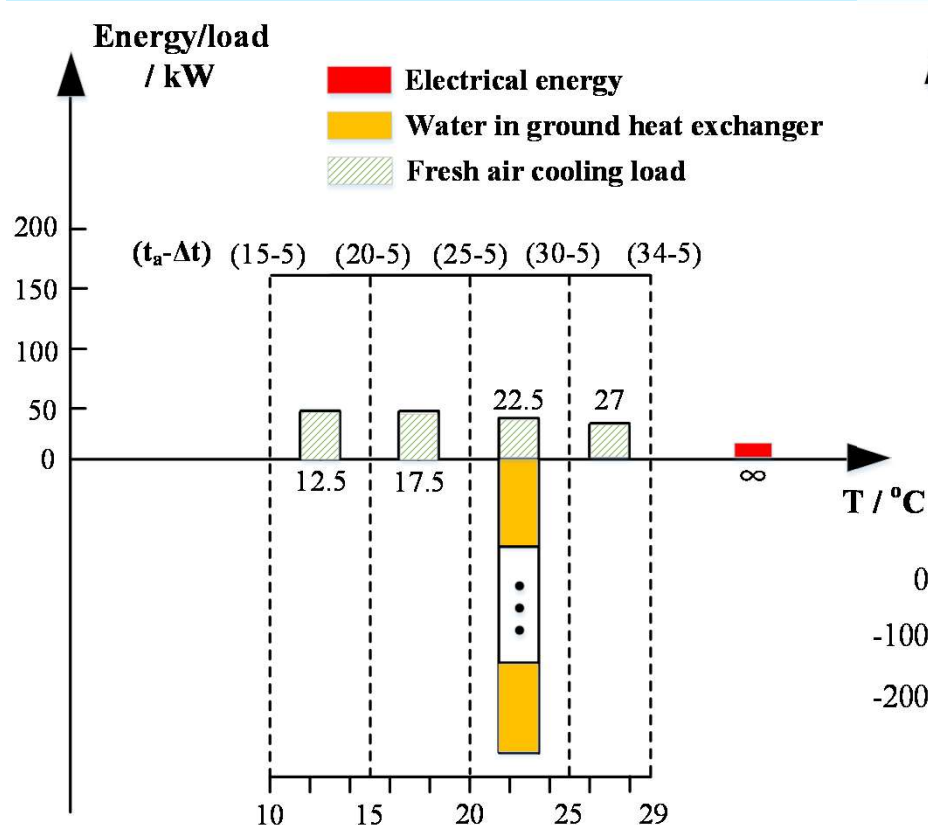


负荷和能源数量与品位分布图

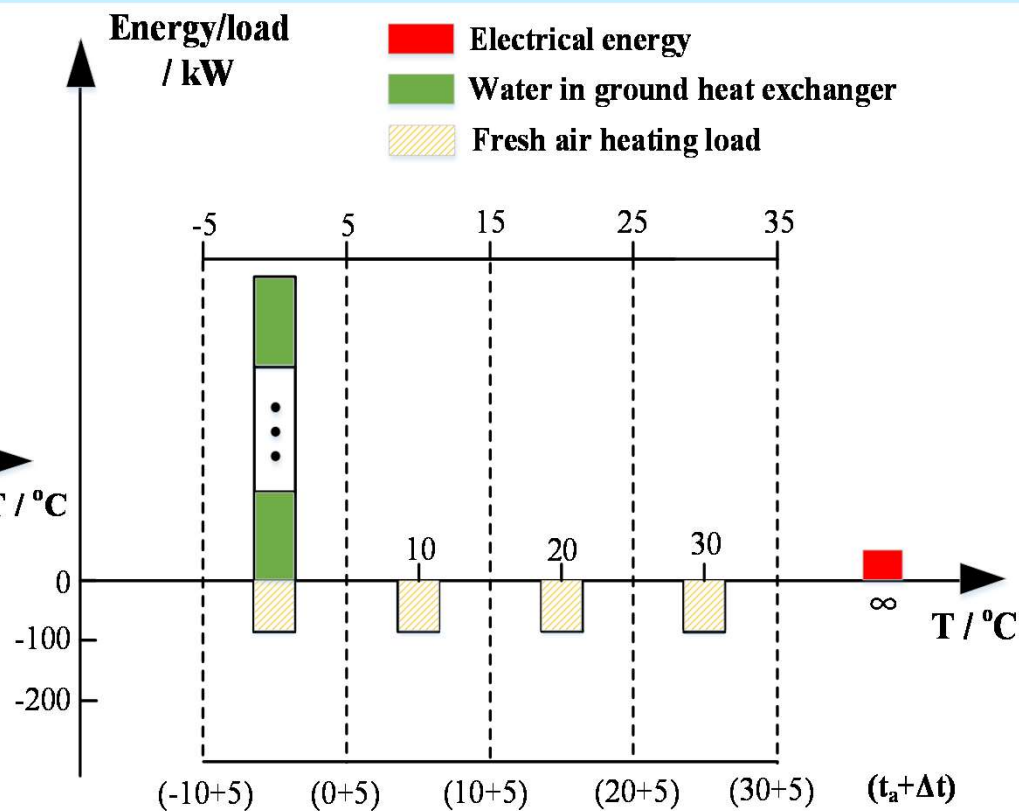
根据能源与负荷吸/放热属性，以温度为横坐标，建立**负荷数量与品位分布图**

- 纵坐标代表负荷/能源相应品位的数量。
- 其中电能作为最高品位能源，品位为无穷大

空气处理流程构建方法



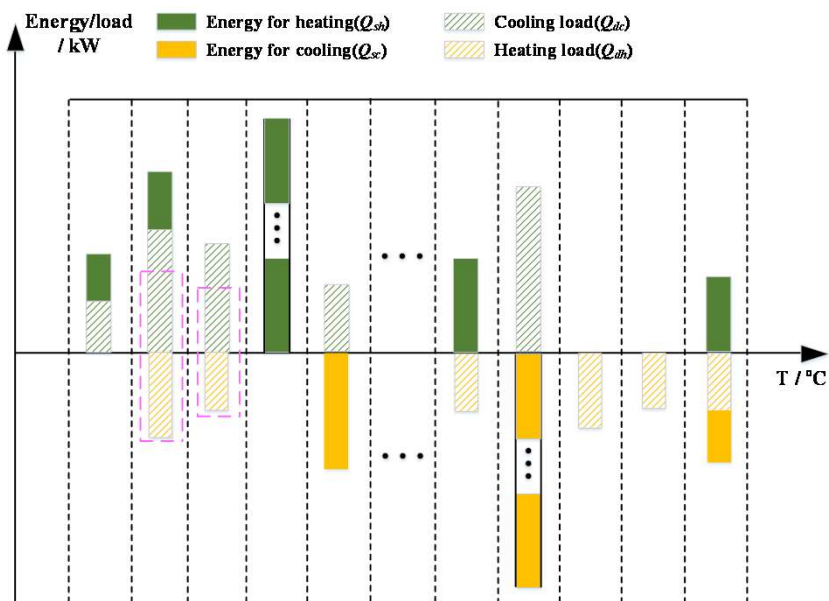
夏季新风冷负荷和能源品位分布图



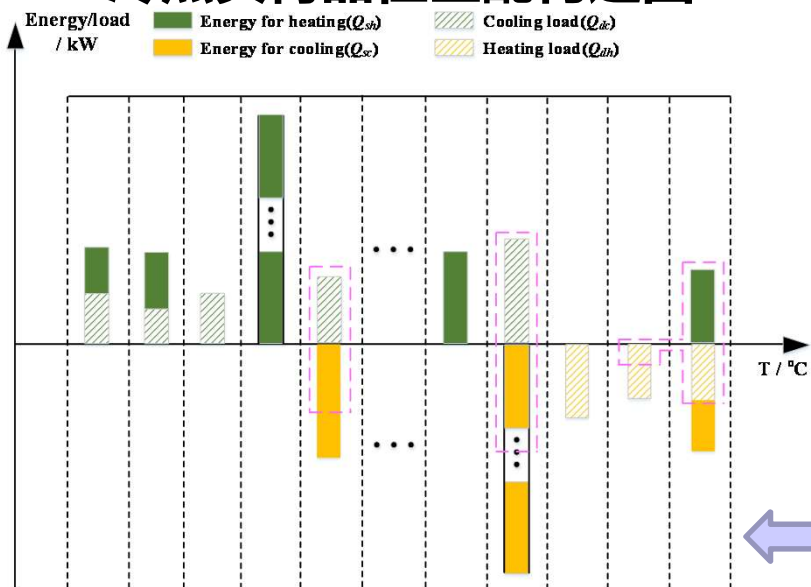
冬季新风热负荷和能源品位分布图

- 在能源与负荷品位分布图上可以清晰看出能源与负荷品位之间的品位高低关系
- 有利于进一步进行空气处理流程构建

空气处理流程构建方法



冷热负荷品位匹配构建图

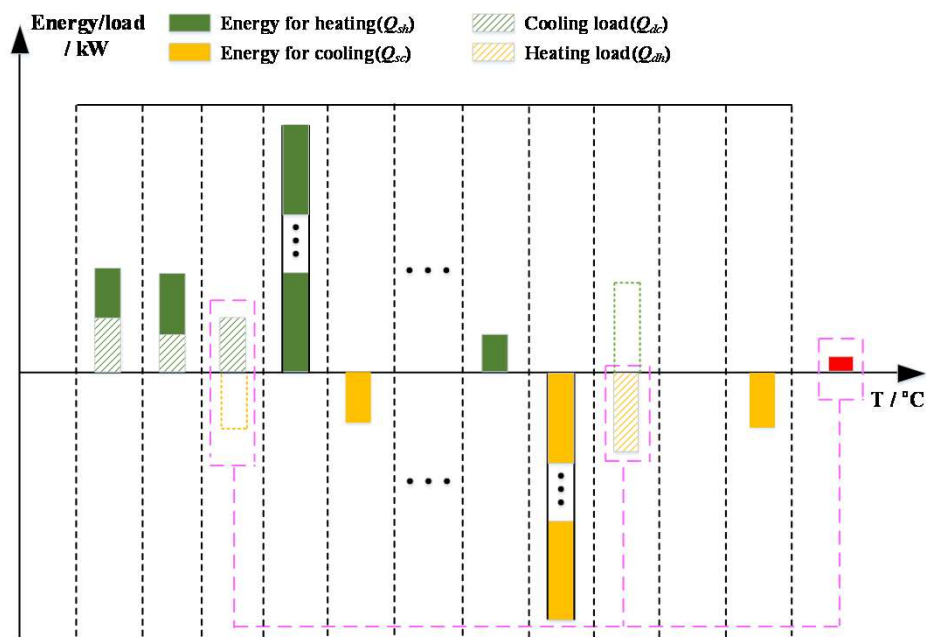


高品位冷负荷处理低品位热负荷构建图

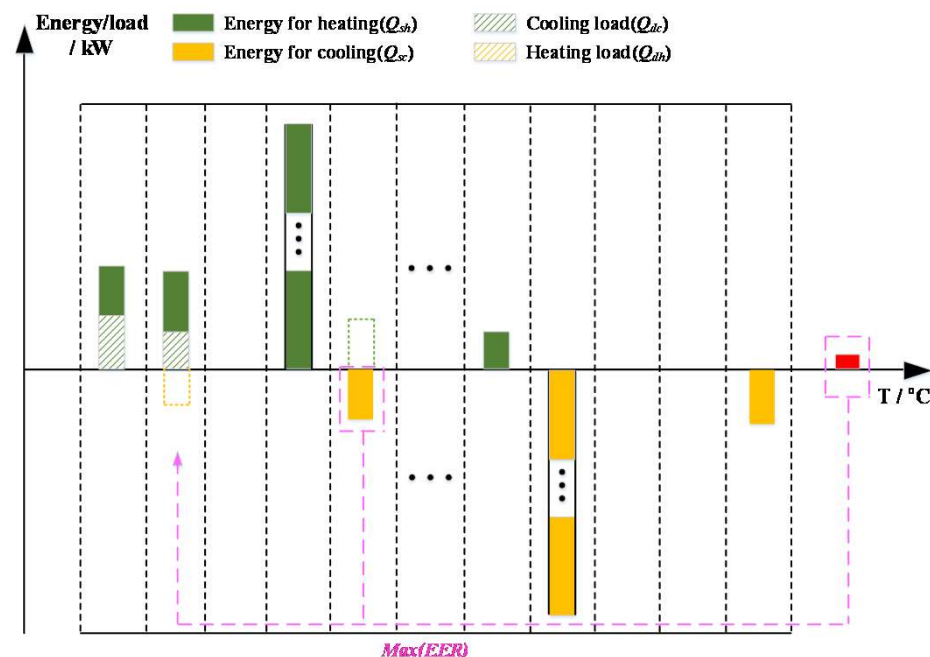
- 品位匹配或高品位处理低品位时，直接构造换热器满足需求
- 冷热负荷同时存在时，优先利用需求负荷互相满足

匹配/高品位能源处理负荷构建图

空气处理流程构建方法



能源与负荷品位匹配构建图



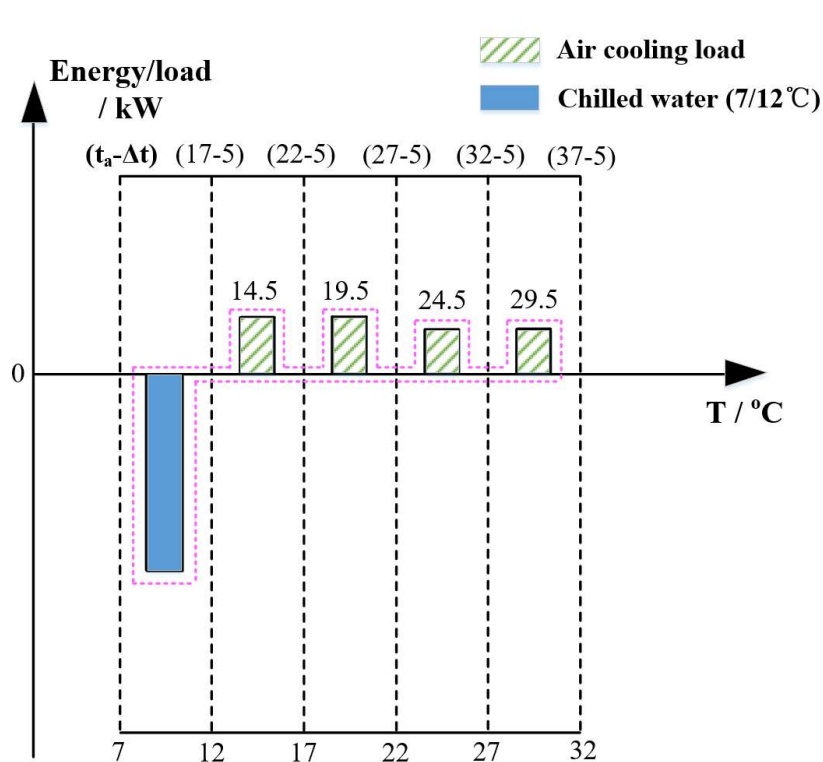
能源与负荷品位匹配构建图

- 利用低品位负荷/能源处理高品位负荷时，通过构造热泵提升到合适品位，满足需求

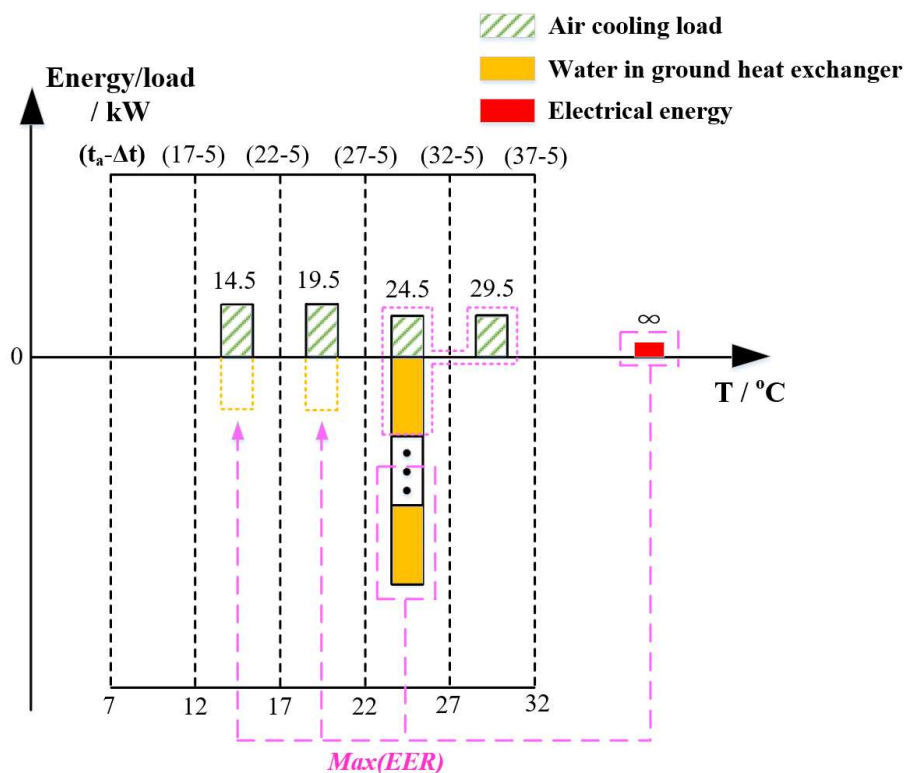
通过匹配算法得到投入的高品位能量（电能）最少的优化设计系统，实现废能和自然能源充分利用，并显著降低机械冷热源的数量和温度品位

按品位处理方案与传统方案的比较

➤ 以空气从37-17°C降温为例，地理管循环水22-27°C，负荷分为4级



传统7/12°C冷水统一处理空气流程

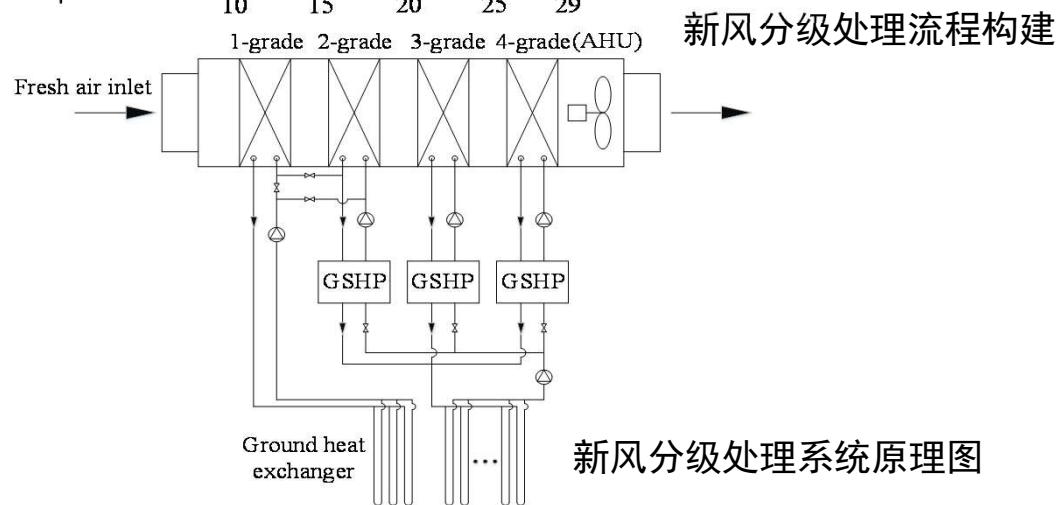
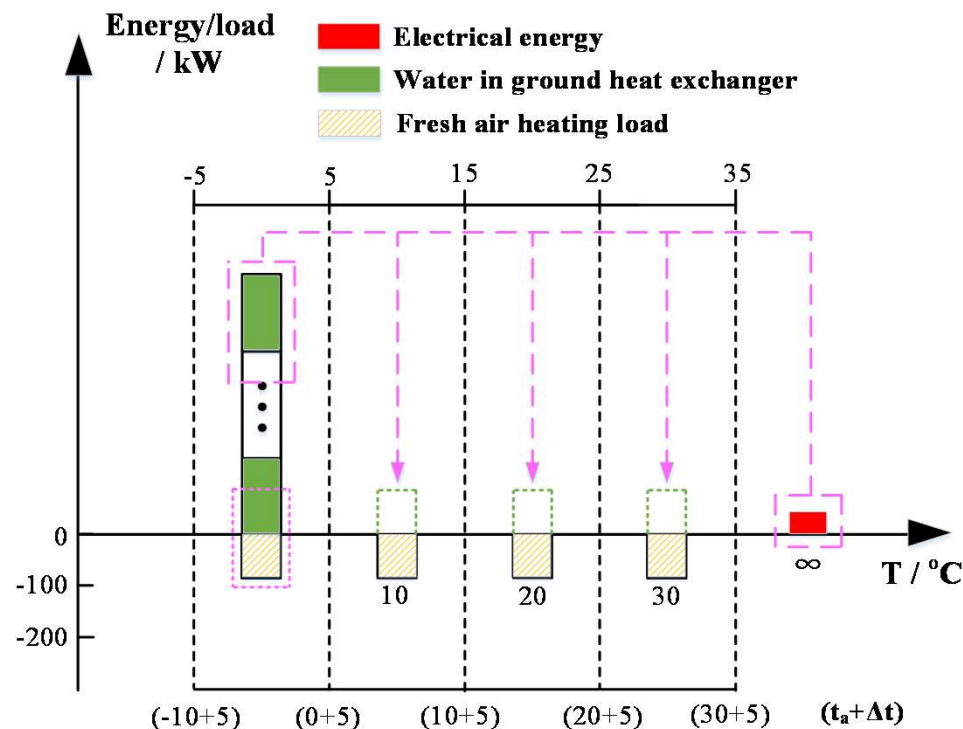
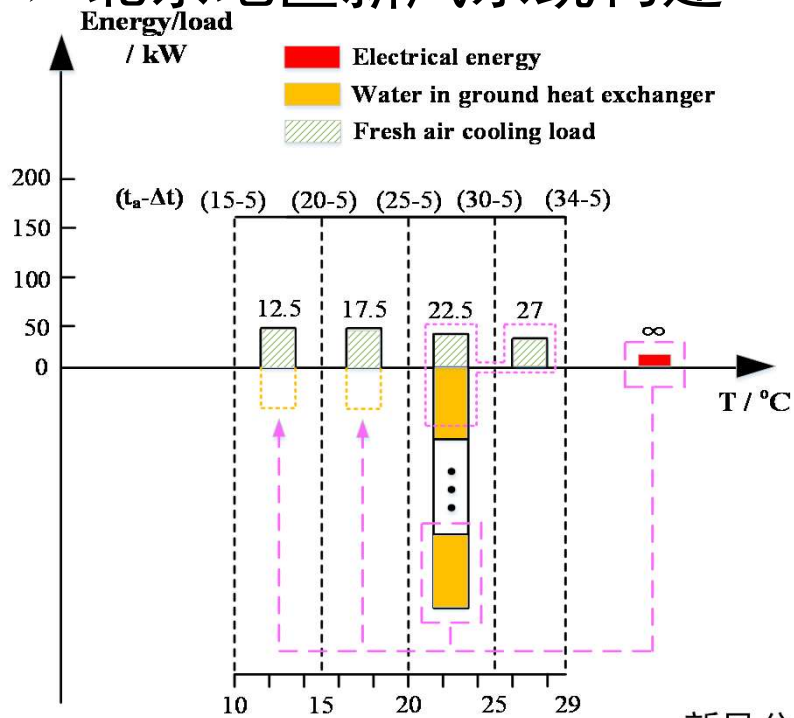


能源品位匹配分级处理空气流程

- 相比传统7/12°C冷冻水统一处理负荷方式，负荷分品位处理方式可以充分利用地理管循环水直接处理品位负荷 $Q_{24.5^\circ\text{C}}$ 和 $Q_{29.5^\circ\text{C}}$
- 剩余品位负荷 $Q_{14.5^\circ\text{C}}$ 和 $Q_{19.5^\circ\text{C}}$ 通过构造两台热泵制取平均温度为14.5°C和19.5°C的冷冻水分别处理，实现高温冷水供冷

空气处理流程构建案例：新风系统

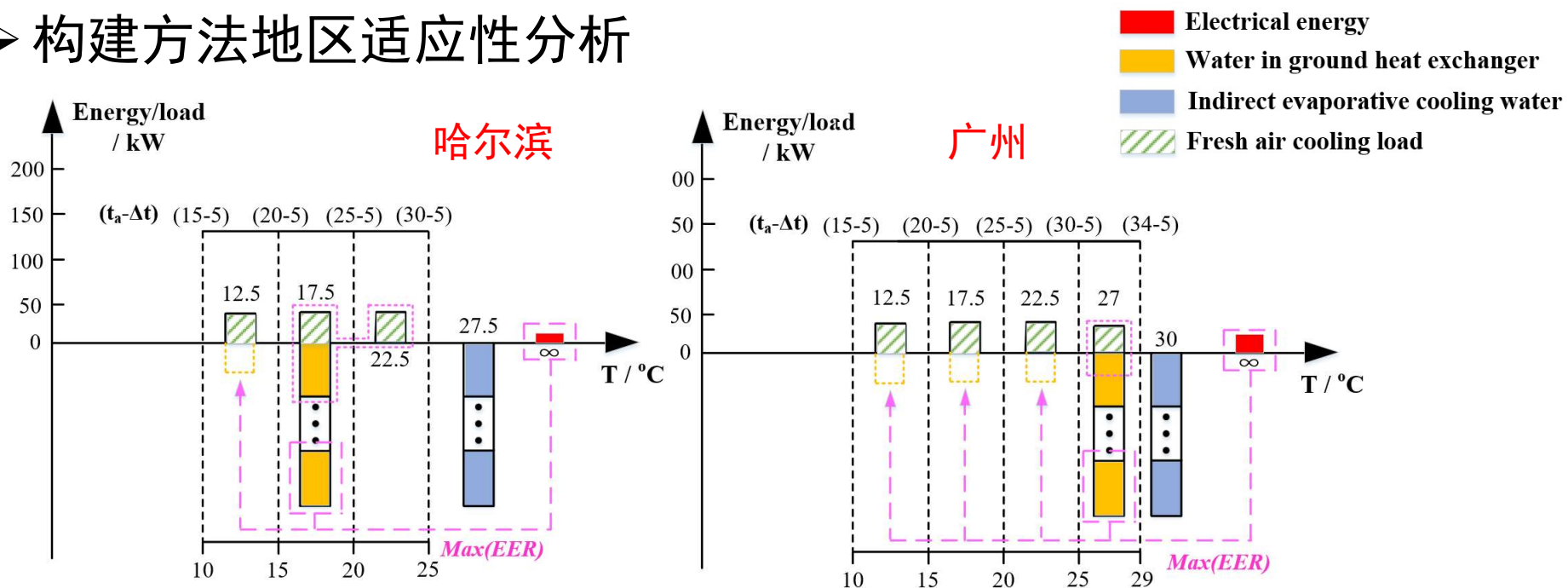
北京地区新风系统构建



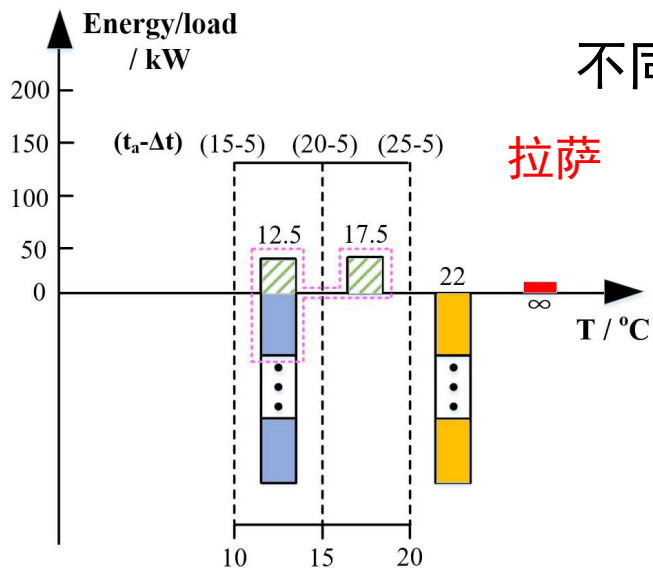
- 地理管循环水直接处理低品位新风负荷，对新风进行预冷/热
- 夏季综合节能率16%，冬季综合节能率25%

空气处理流程构建案例：新风系统

构建方法地区适应性分析



不同地区夏季新风分级处理流程构建



- 基于不同地区可利用的自然能源条件，通过流程构建方法可以构建出适合当地的定制化空气处理方案

输配系统存在的问题及降低输配能耗的主要途径

□ 输配系统高能耗的主要原因

- 空气处理装置存在大量全年仅使用部分时间的部件，如冷热盘管、加湿装置等
- 不必要的长距离输送，如全空气送、回风
- 大量阀门导致部分负荷下的输配效率低下

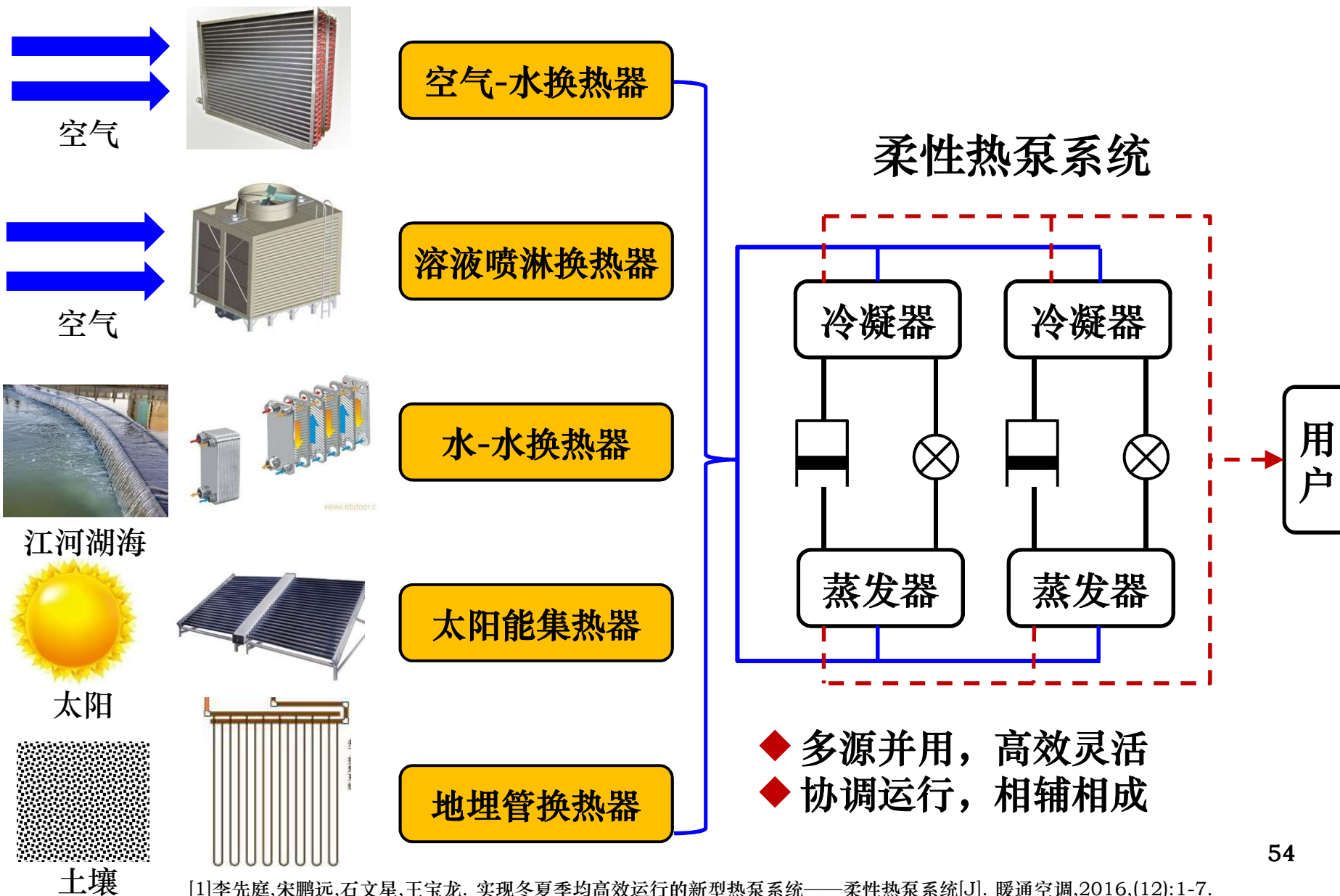
□ 降低输配系统高能耗的主要途径

- 合理设计冷热水温度，使冷热盘管共用；不长时间使用的部件应设置移除或旁通机制
- 采用独立新风+循环风处理方案，减少回风的长距离运输
- 采用风机/水泵代替阀门，减少全体介质加压后局部阀门减压

目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

采用复合源/柔性热泵系统显著提高全年性能

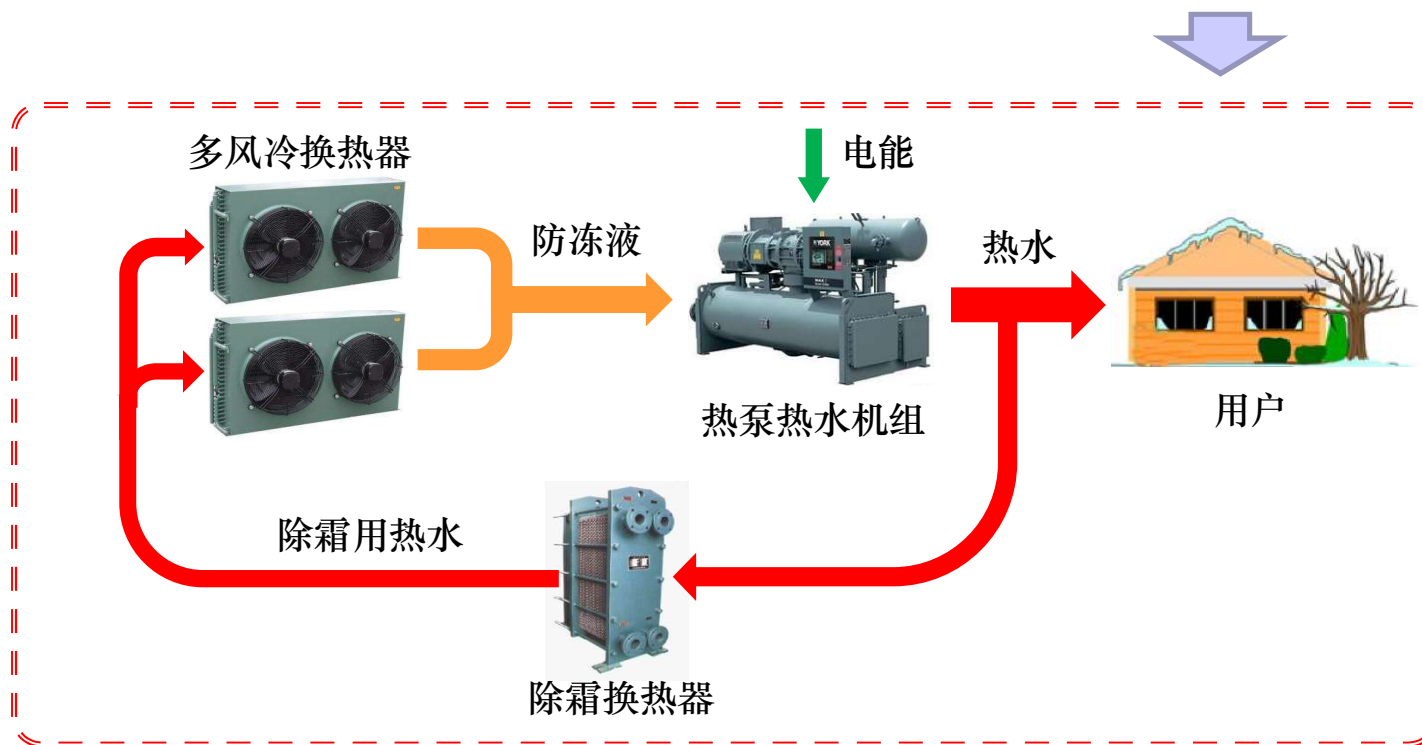
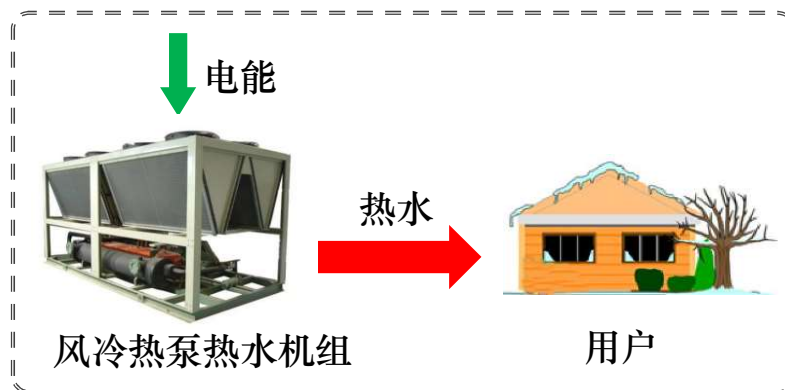


[1]李先庭,宋鹏远,石文星,王宝龙. 实现冬夏季均高效运行的新型热泵系统——柔性热泵系统[J]. 暖通空调,2016,(12):1-7.

提高空气源热泵系统除霜性能

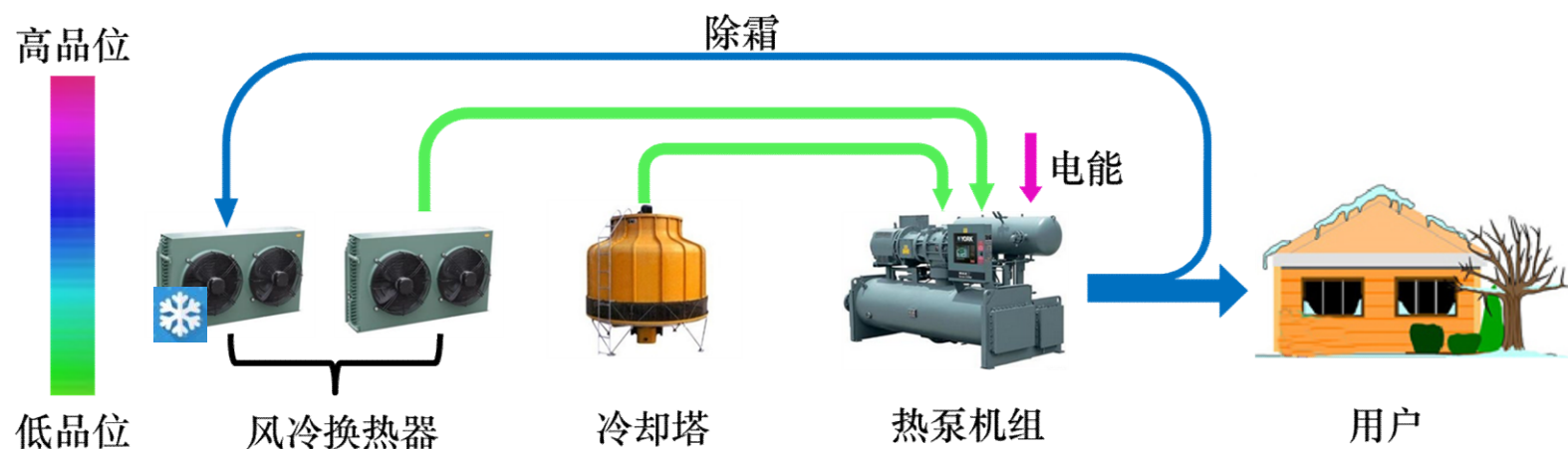
□ 多台风冷换热器：连续供热

- ✓ 避免压缩机逆循环除霜的启停损失
- ✓ 提高供热能效
- ✓ 用于北方供暖或全年生活热水



实现空气源热泵系统冬夏季均高效运行

□ 风冷换热器+冷却塔：冬季供热 夏季供冷



✓ 运行模式：

➢ 夏季：冷却塔，高效制冷

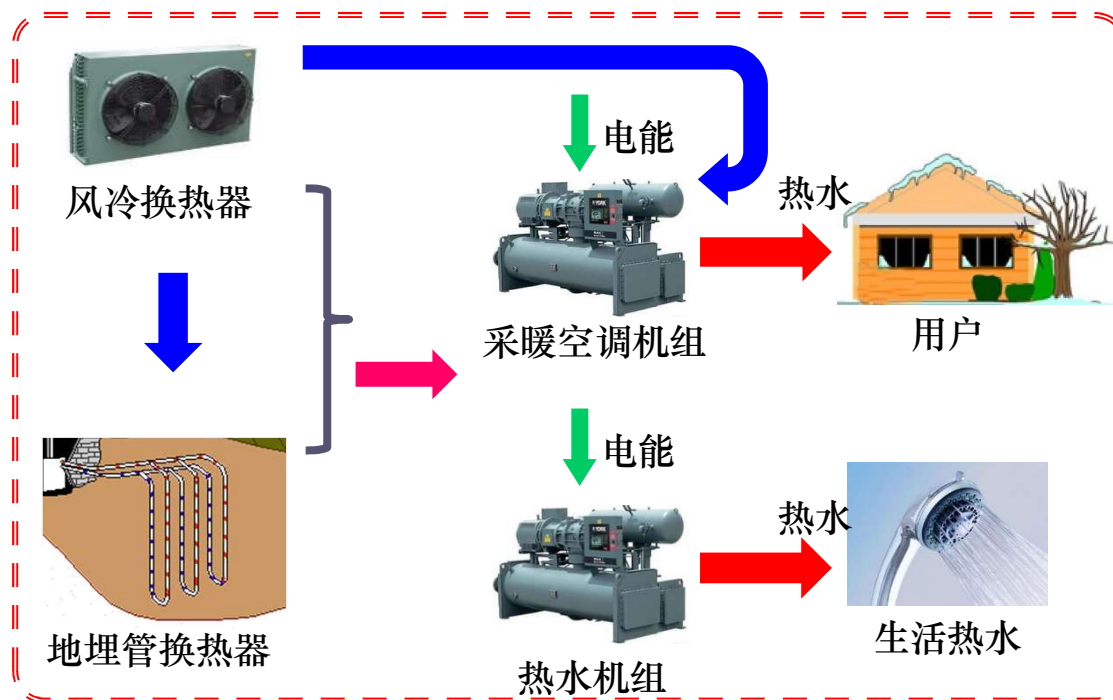
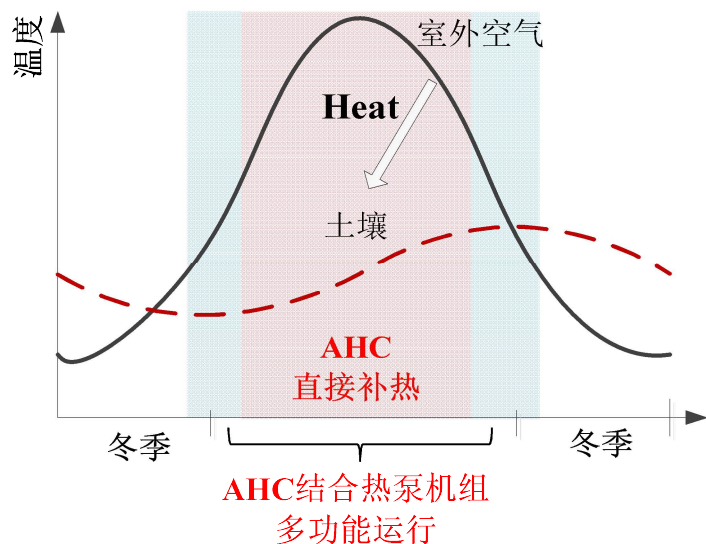
➢ 冬季：风冷换热器，高效除霜、连续制热

✓ 风冷换热器和冷却塔搭配使用，优势互补，实现冬夏季均高效运行

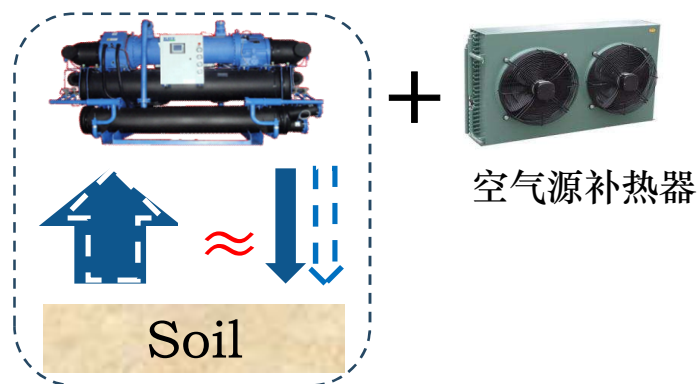
✓ 夏季能效能够提高**13%~30%**

实现土壤源热泵系统全年热平衡及高效运行

□ 风冷换热器+地埋管

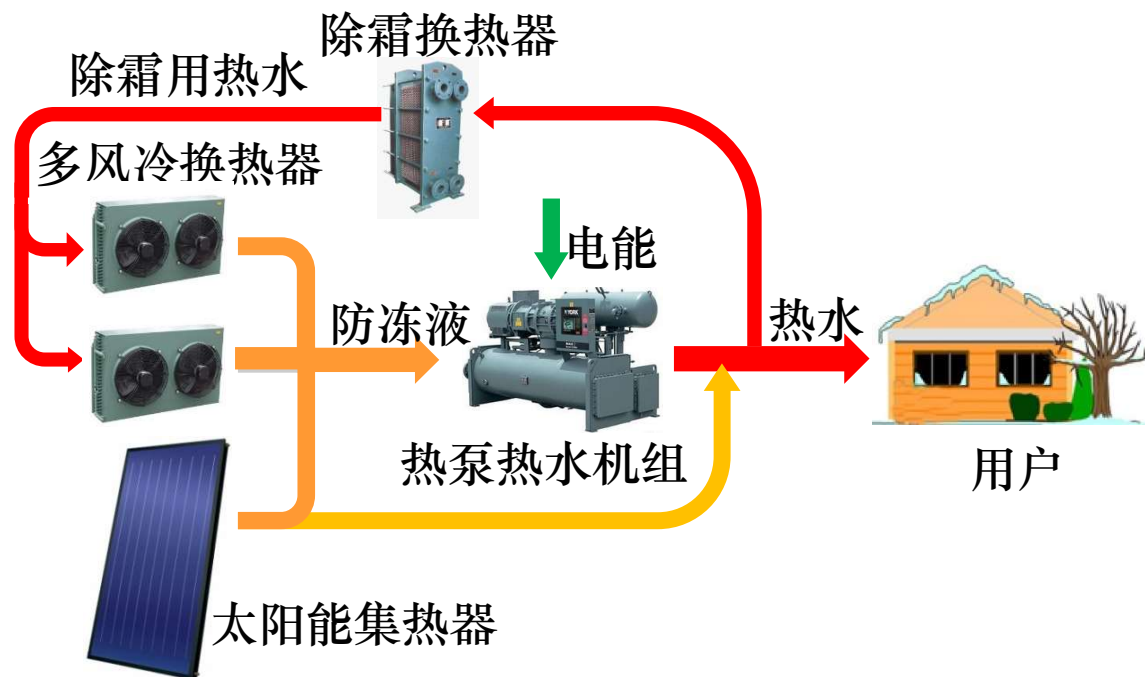


- ✓ 供暖、供冷、供生活热水
- ✓ 经济高效维持土壤热平衡



实现太阳能+空气源热泵系统的高效结合

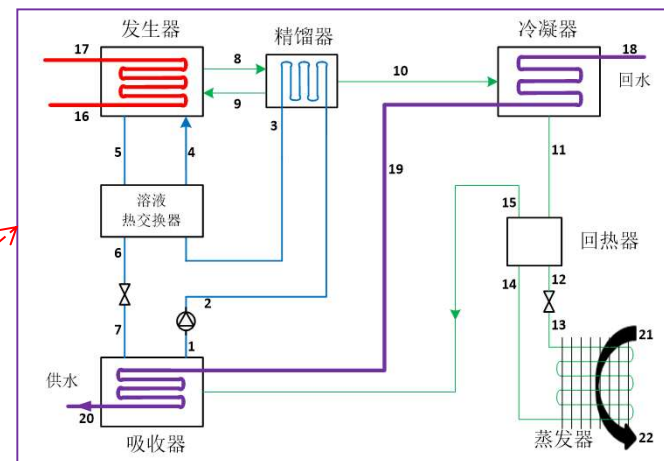
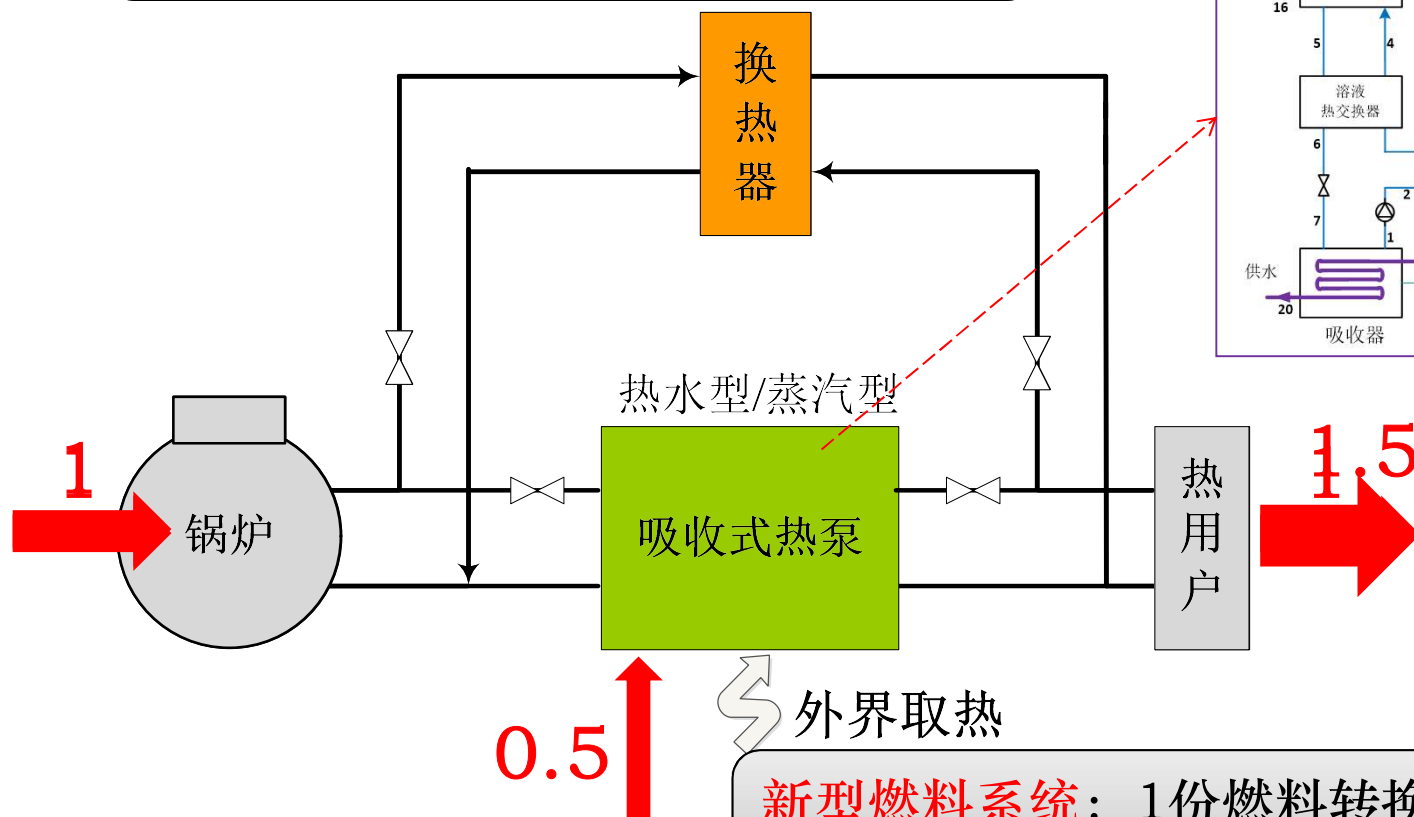
□ 风冷换热器+太阳能



- ✓ 晴天: 太阳能直接供热, 能效高
- ✓ 阴雨天、清晨、傍晚: 太阳能+空气源供热, 性能优于空气源热泵, 充分利用较弱的太阳辐射
- ✓ 夜晚、低温结霜: 空气源供热, 供热稳定, 除霜能效高于传统方式

利用燃料/热源驱动热泵构建高效热水系统

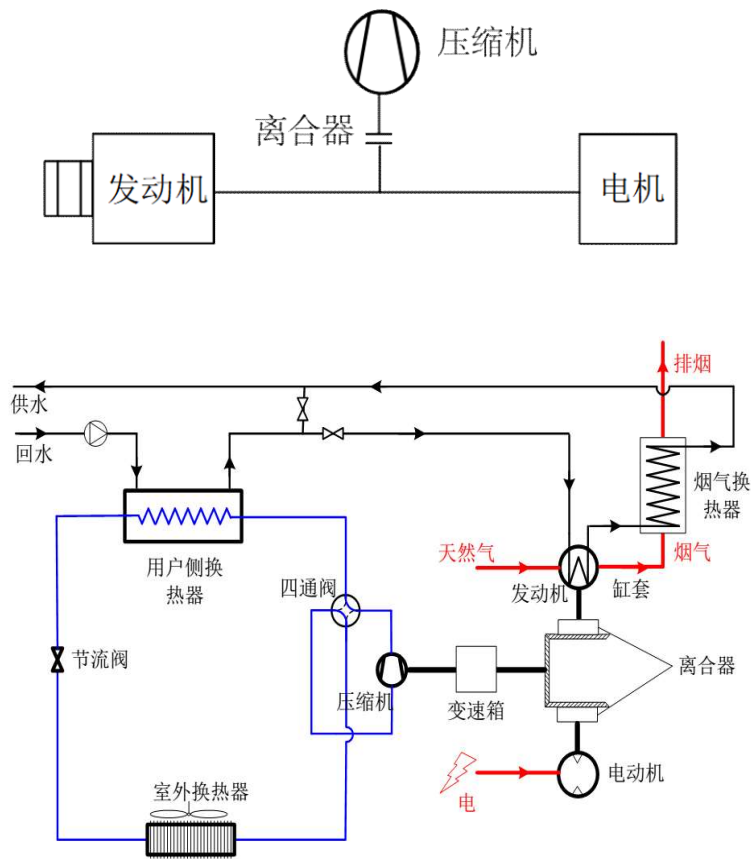
传统燃料系统：1份燃料最多得到1份热量，效率无法超过100%



新型燃料系统：1份燃料转换为热量时，还从环境提取0.3~0.9热量，效率轻易超过100%

利用燃气发动机与电动机构建混合动力热泵系统

将电动机与燃气发动机结合在同一套系统中，构建出混合动力热泵系统



混合动力热泵系统图

➤ 切换型

- 冬季：使用**燃气热泵供热**
(离合器**仅**与燃气发动机连结)
- 夏季：使用**电热泵供冷**
(离合器**仅**与电动机连结)

□ 优点：简单易行，发挥两种设备各自的优势，提高全年供热供冷能效

□ 缺点：两种设备选型较大，存在容量冗余现象

➤ 联合驱动型

- 离合器**同时**与燃气发动机、电动机连结，二者可同时工作，有利于减小设备选型

研发不同额定工况的冷热水机组

不同品位负荷需要
不同水温来处理

要求

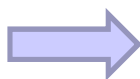
热泵机组制备不同
水温

目前额定工况

制冷：供水7°C

制热：供水45°C

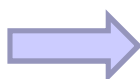
水环式热泵



汇侧30°C

源侧20°C

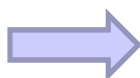
地埋管式热泵



汇侧25°C

源侧10°C

风冷热泵



汇侧35°C

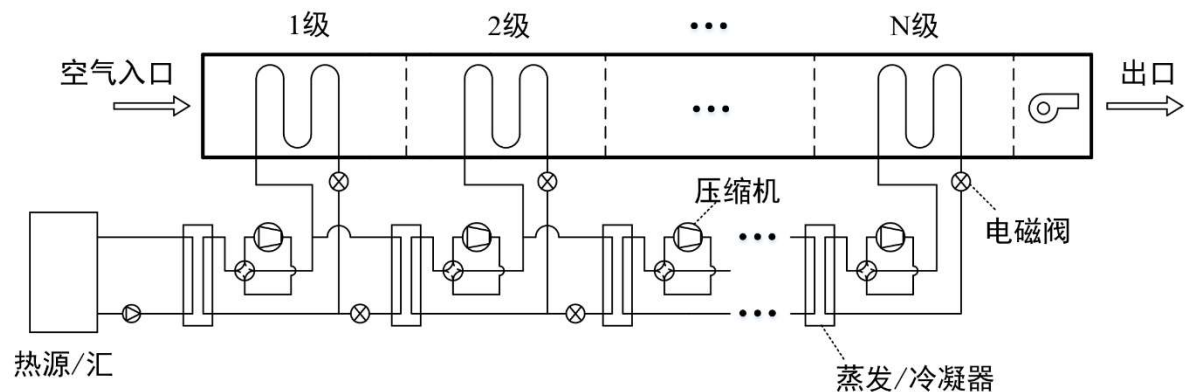
源侧7°C

- 目前各类热泵机组额定工况供水温度单一；当制备不同温度冷热水时，导致热泵机组效率不高效
- 未来应研发生产多种额定工况的冷热水机组，使得机组在生产更低品位冷热水时效率更高

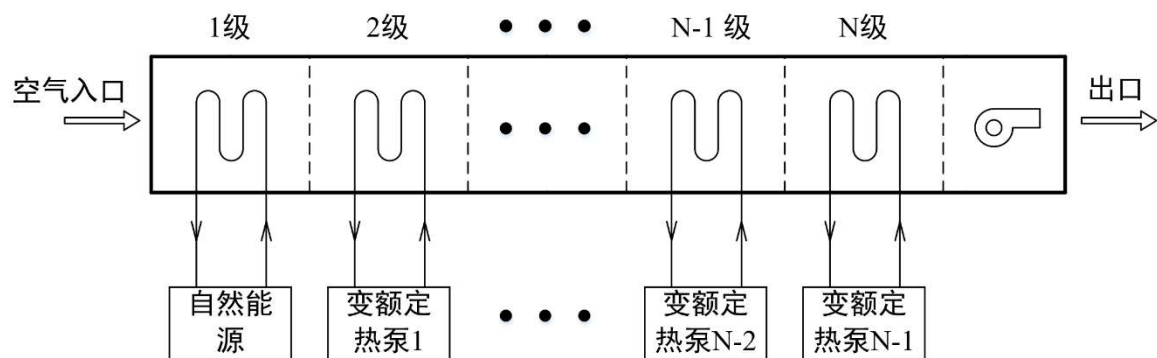
未来直膨式和冷热水机组均应适应分级空气处理要求

➤ 针对多供水温度需求，未来分级处理系统可能的工程化解决方案

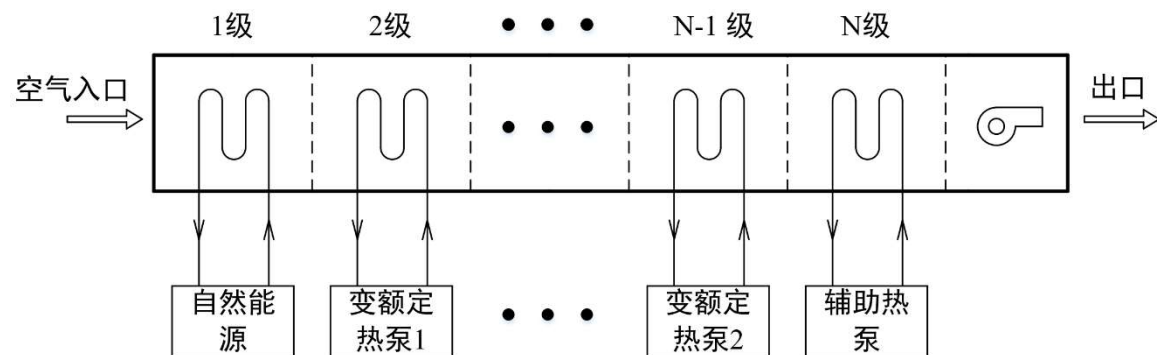
直膨式多级
小压比热泵



多种额定工
况热泵联合



2~3种低中品
位水温+1~2
类辅助热泵



目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

大数据与智能运维在空调系统中的应用

- 目前空调系统已有大量运行数据，但挖掘利用不充分
 - 充分利用大量运行数据优化运行策略，使负荷与设备系统性能更好搭配
 - 利用大数据做好故障预警和设备系统亚健康管理
- 传统空调系统大部分未实现优化控制，还主要停留在人工远程操作层面
 - 利用大数据及专家经验，通过人工智能技术，全面提高运行水平
 - 设备和系统维护也由人工经验上升到智能维护

提高空调系统柔性以消纳更多可再生能源

- 空调负荷在电力负荷中占有很大比重，使其已成为季节性峰谷拉大的主要原因。若空调负荷不能增加柔性，则会对电网的稳定运行产生较大的影响。
- 未来空调系统应充分利用水蓄冷/热、冰蓄冷、相变储能等蓄热/冷装置，增加空调系统柔性，通过电力系统的需求侧响应，主动错峰或主动消纳可再生能源。
- 利用风机、水泵、压缩机等变频调速与送风温度、送水温度、蒸发温度等参数的调节结合，利用空调系统的热惯性和被控环境及建筑物的热惯性。

制订空调系统减碳效果定量评估规范

- 目前国内大部分技术标准仍大多关注空调系统节能量评估，评估方法较为粗放，可执行性有待提高。
- 在减碳效果评估方面需要重点发展如下几个方面：
 - 从关注节能量评估转换到减碳量评估，并加强标准规范的体系性建设，兼顾气候区域、建筑类型进而建造年代等差异性；
 - 解决在实际采集数据维度不高和数据质量差等情况下减碳量定量可靠评估难题，并形成简单易用的软件工具；
 - 建立长效机制保障减碳评估的客观性、准确性、中立性、公平性和权威性，并进一步提高规范机制的可操作性和可执行性。

建立结果导向的全生命周期问责机制

- 目前我国空调系统领域设计、施工、调试、验收和运行等各个环节较为割裂，难以十分清晰且定量合理地将碳排放摊到具体环节问责，不利于节能减排碳工作推进。
- 目前我国缺少相应的问责机制客观定量公平地界定设计、施工和运行等环节对空调系统实际碳排放的责任。
- 推行问责制将使项目管理更加科学化、规范化、透明化，更大程度地调用项目实施过程中各阶段每一方负责单位的积极性。

目录

- 1. 背景
- 2. 降低空调和供热系统能耗的思路
- 3. 营造面向需求的非均匀室内环境
- 4. 利用自然能源降低室内负荷
- 5. 构建更高效的空气处理流程与输配系统
- 6. 构建适应冷热负荷品位的高效冷热源
- 7. 降低碳空调供暖系统碳排放的其它技术
- 8. 总结

总结

- ◆ 双碳目标对空调供暖系统降低碳排放提出了更高要求
- ◆ 空调供暖实际所需温度品位较低，大力发展高/低温供冷/暖末端可以使自然能源和低品位热源有更多机会承担各种热负荷
- ◆ 降低/提升供暖/空调温度可以显著提高各种类型热泵制取热/冷水的效率，未来宜研发多种额定工况的热泵机组
- ◆ 空调供暖系统应根据每个工程的负荷特点、自然能源和废能情况制定合理的冷热处理方案和冷热源方案
- ◆ 大数据和人工智能在未来空调供暖系统中有很广阔的应用空间，未来还应制订促进低碳技术应用的规范、标准与机制

谢谢!

Xianting Li, Tsinghua University
xtingli@tsinghua.edu.cn

