

对多联机空调技术发展方向的思考

清华大学 建筑技术科学系 石文星

wxshi@tsinghua.edu.cn

2023年1月14日 · 青岛



主要内容

- 背景
- 技术发展现状
- 存在的主要问题
- 多联机发展方向
- 结束语



多联机空调（热泵）系统

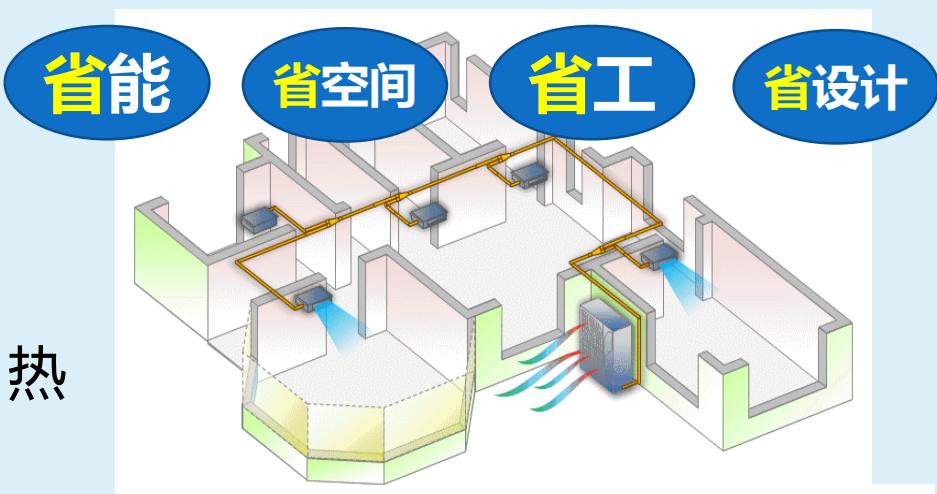
● 多联机的系统特点和类型

□ 系统特点

- 制冷剂直接蒸发
- 室内机独立控制
- 安装施工简便
- 维护管理简单

□ 系统类型

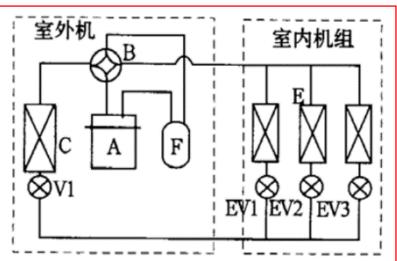
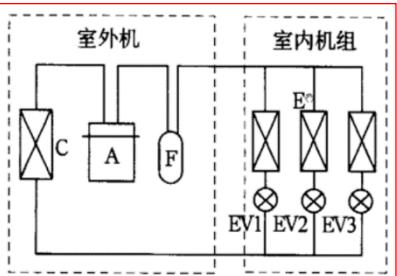
- 单冷型、热泵型、热回收型
- 空气源、水(地)源



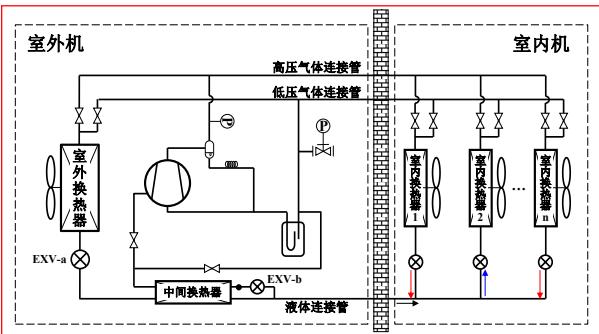
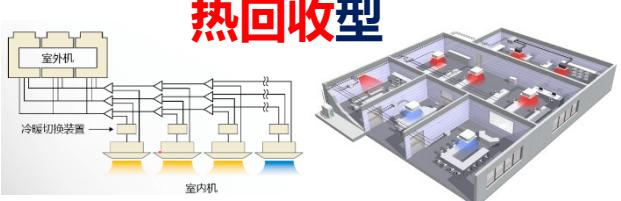
单冷型



热泵型



热回收型



风冷型



风冷型



风冷型

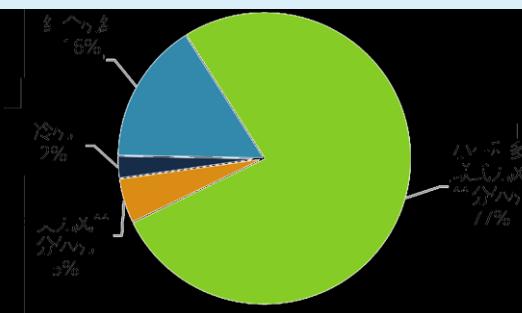


水冷型

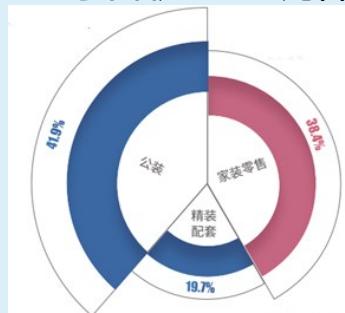
多联机产业现状

● 多联机产品市场现状

- 据IEA统计^[1]：全球空调设备保有量中，**房间空调器+多联机**占比达**77%**
- 据中央空调市场总结报告^[2]：2021年，**年销售额超过1200亿元**，占比**中央空调市场的50.91%**
- 多联机产品广泛应用于**办公楼、酒店、别墅、学校**等建筑，近年在**住宅建筑**中的占比快速增加



全球各机型空调保有量^[1]



家装市场约占**60%**^[1]



办公楼



酒店



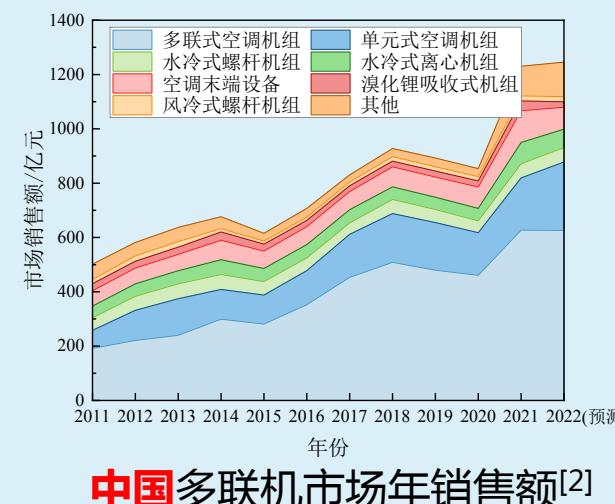
医院



别墅



单元式住宅



中国多联机市场年销售额^[2]

[1] International Energy Agency. The future of cooling: Opportunities for energy- efficient air conditioning (2019).

[2] 2011~2021年度中国中央空调市场总结报告，中国中央空调市场。

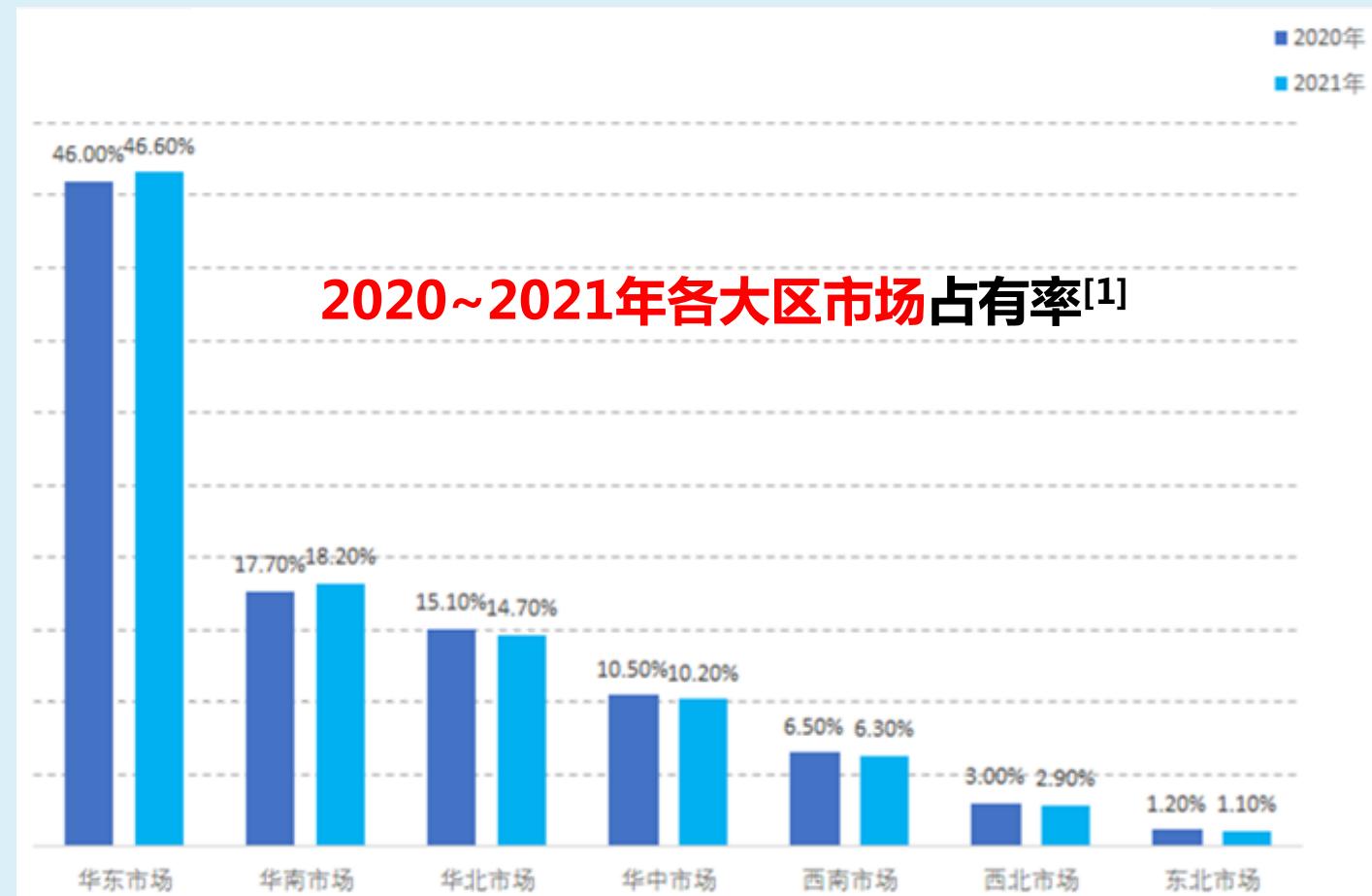


多联机产业现状

● 相关行业调研

报告表明：

- 多联机行业**产业大、类型丰富，生产规模不断扩大**
- 多联机广泛用于**公装、家装市场，华东地区占有率高**



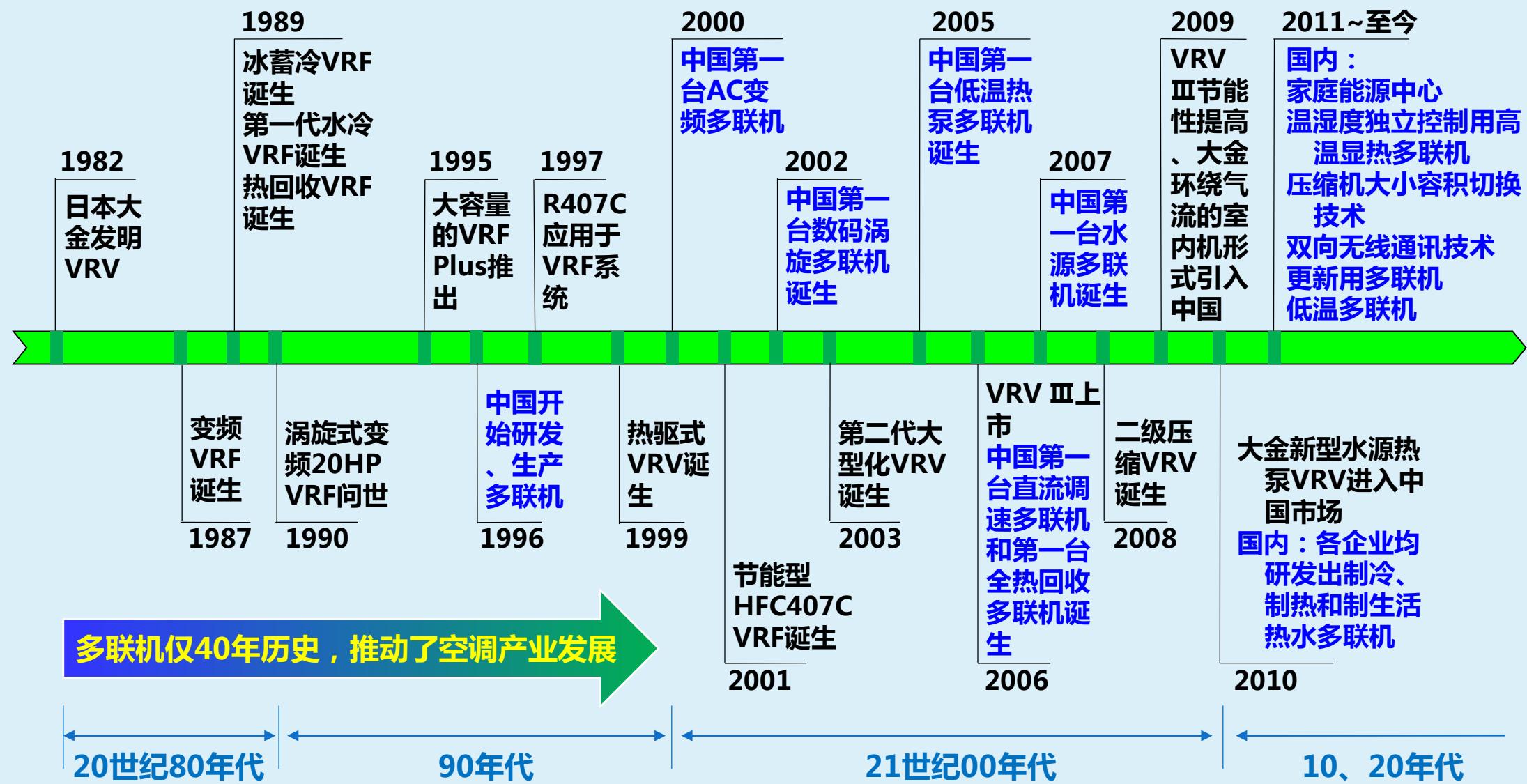
[1] 2021年度中国中央空调市场总结报告，中国中央空调市场。

主要内容

- 背景
- 技术发展现状
- 存在的主要问题
- 多联机发展方向
- 结束语

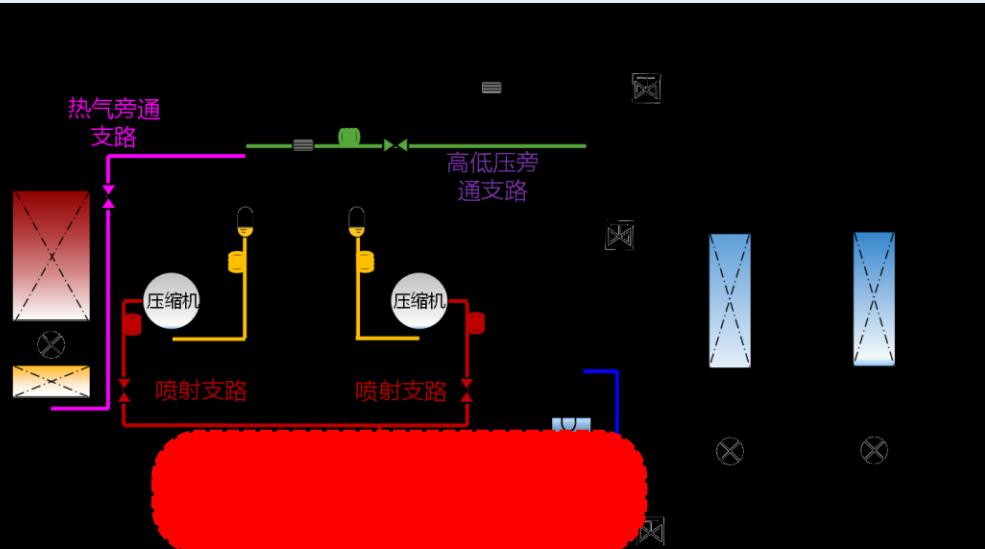


多联机的发展历程（回顾）

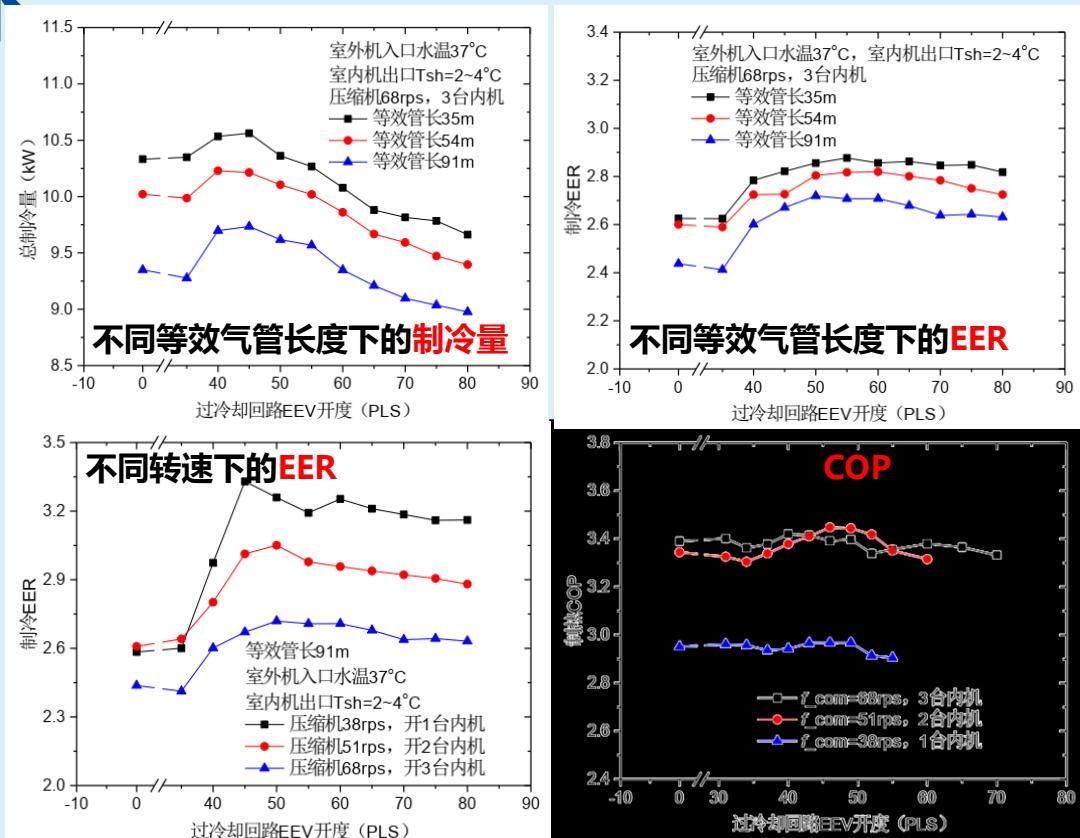


技术发展现状：产品技术

① 中间换热器过冷却技术



带过冷却支路、补气支路、回油支路的多联机



结论：

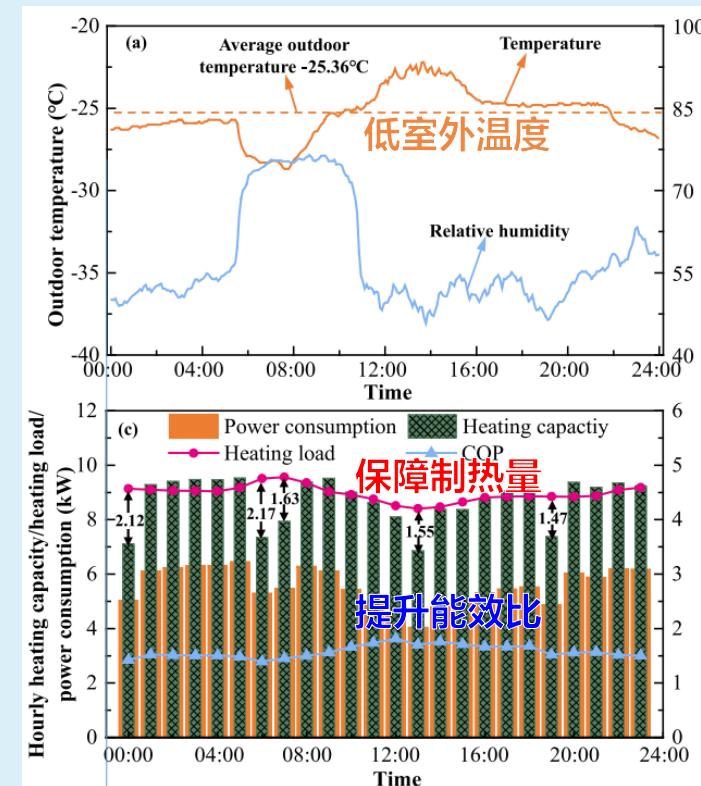
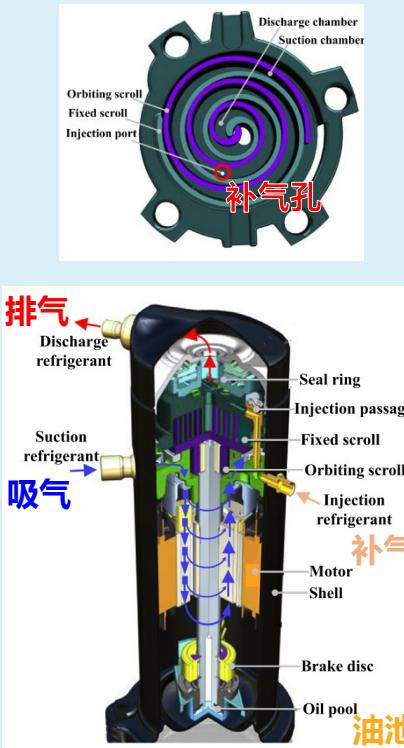
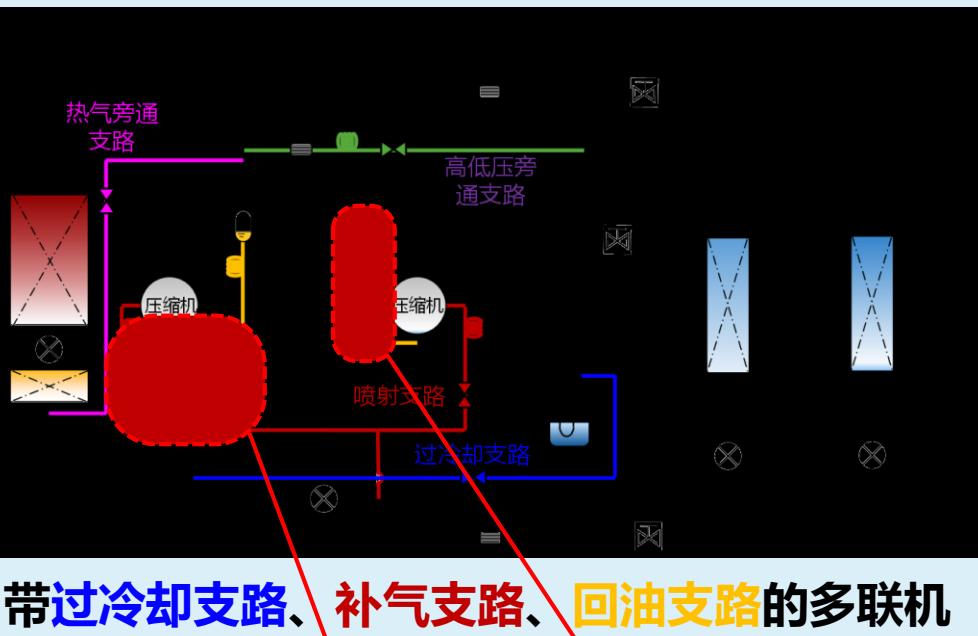
- 制冷工况：在一定旁通率范围内，过冷却支路是抑制高压液态制冷剂沿程闪发的技术途径，同时提升制冷量和制冷 EER；配管长度越大，过冷却回路对多联机性能的优化潜力越大
- 制热工况：开启过冷却支路能提高室外机 EEV 的调节稳定性

[1] 李子爱 等. 过冷却回路对多联机性能的影响[J]. 制冷学报, 2018, 39(05):36-46.



技术发展现状：产品技术

② 补气（制冷剂喷射）技术



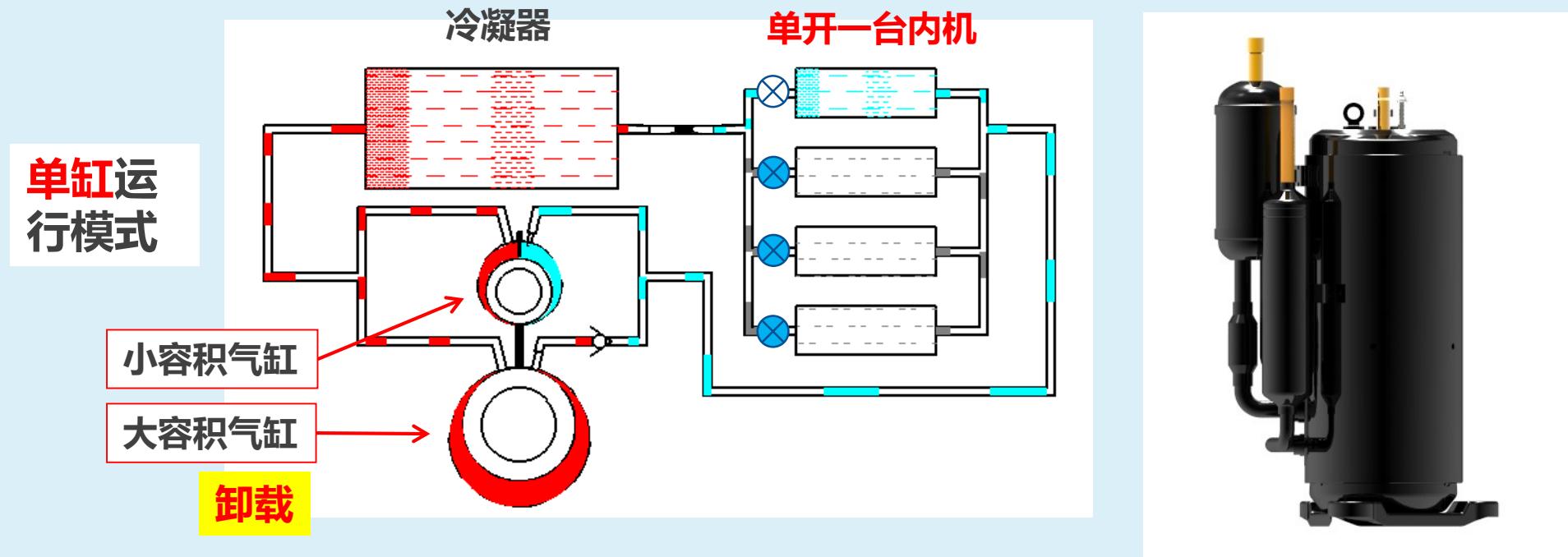
结论：

- 补气技术能够提升低温环境下的系统制热量和能效比，解决空气源热泵在北方严寒地区的应用难题

[1] Wei W, Ni L, Xu L, et al. Application characteristics of variable refrigerant flow heat pump system with vapor injection in severe cold region[J]. Energy and Buildings, 211.

技术发展现状：产品技术

③ 面向家用多联机的大小气缸联合与卸载运行变频压缩机成功应用



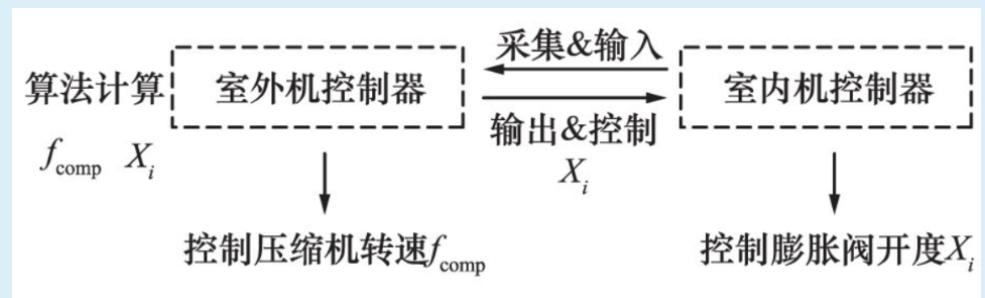
- 常规多联机：在过低负荷下，因偏离最佳效率点过远，从而导致系统的能效低，也导致家用多联机实际使用时长期处于低效状态运行
- 大小容积切换与组合运行+变频压缩机技术，能有效提升低负荷率时的能效比，不仅可提升家用多联机的全工况效率，也对大型多联机有积极的推动作用



技术发展现状：产品技术

④ 多联机循环控制技术：控制策略发展

● 集中控制策略



● 分散、集中控制策略

① 定吸/排气压力控制

$$Q = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \alpha K F \Delta T_{in,i} d\tau$$

Q ——室内机在 τ_1 ~ τ_2 时间内的换热量 (J)；

α ——通断系数，室内机电子膨胀阀关断时为0，开启时为1；

K ——传热系数 ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)；

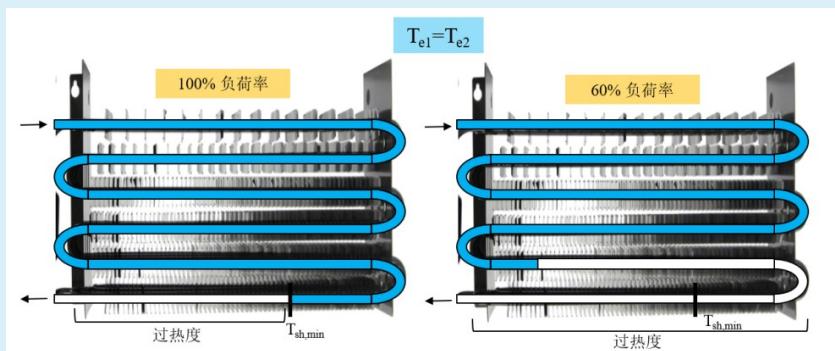
F ——换热面积 (m^2)；

$\Delta T_{in,i}$ ——制冷剂与室内空气的平均温差 (K)；

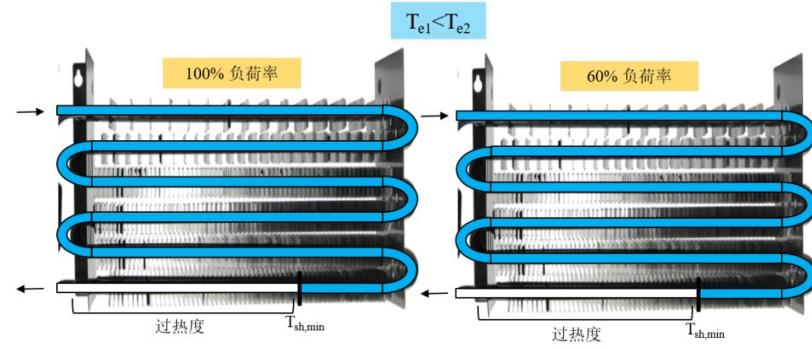
τ_j ——j时刻，s。

- ◆ 室内机控制方式：

- ① 通断控制：调节通断系数 α 控制室温
- ② 连续控制：调节换热器热容量KF控制室温



② 变吸/排气压力控制

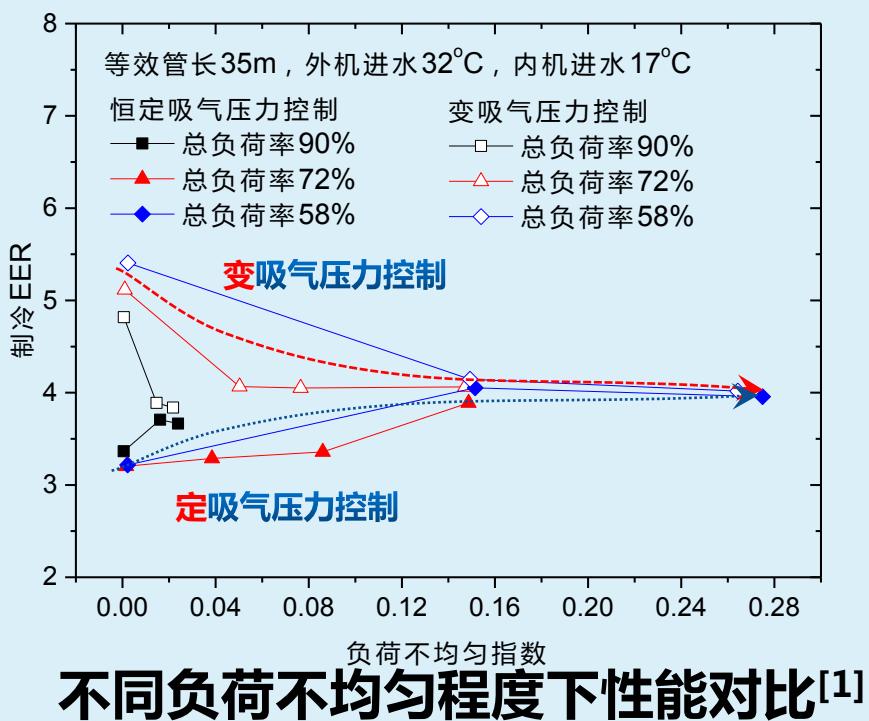
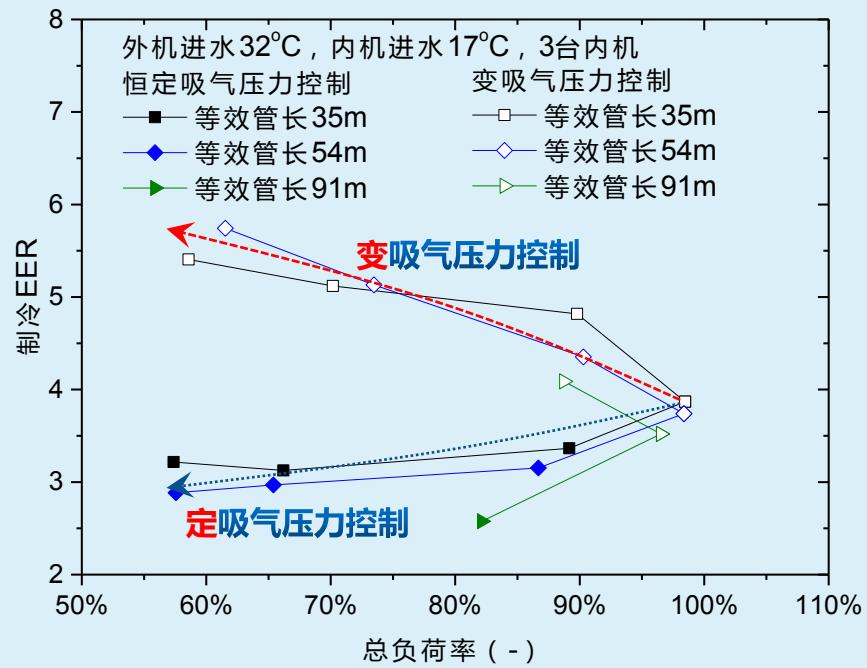


- 多联机的循环控制策略历经集中控制向分散控制发展
- 当前主流产品的控制策略以定吸/排气压力、变吸/排气压力控制为主

[1] 肖寒松, 张国辉, 石文星, 等. 多联机控制技术进展与展望[J]. 制冷与空调, 2019, 19(11):11.

技术发展现状：产品技术

④ 多联机循环控制技术：变吸/排气压力控制的节能特性



结论：

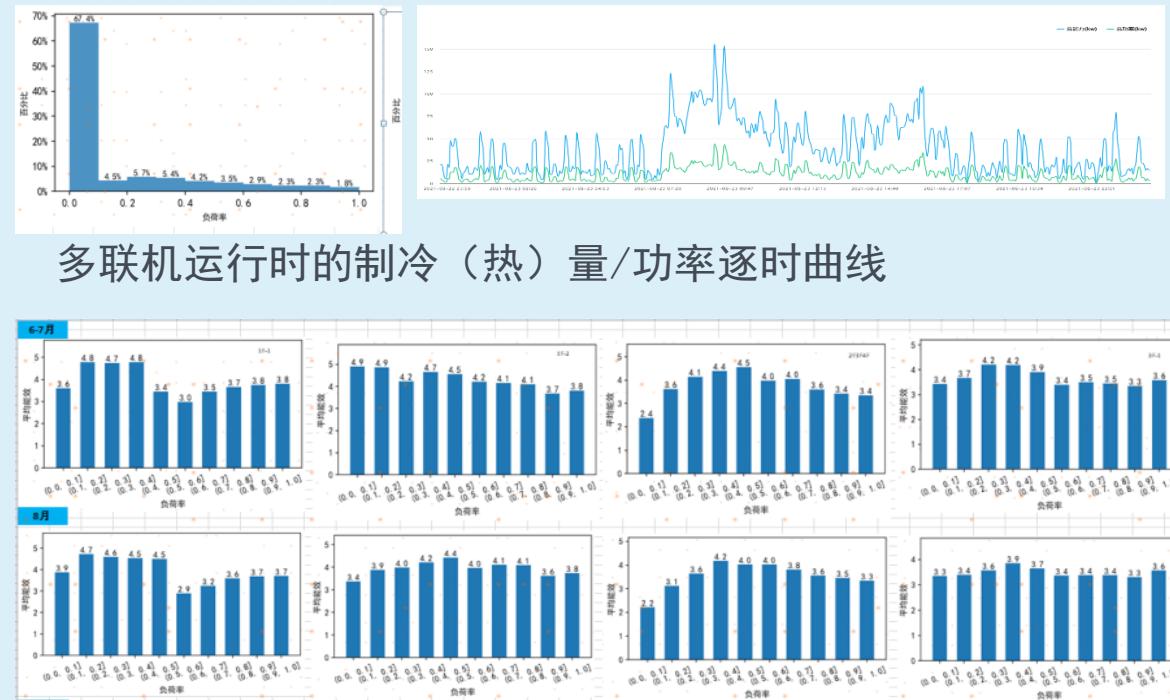
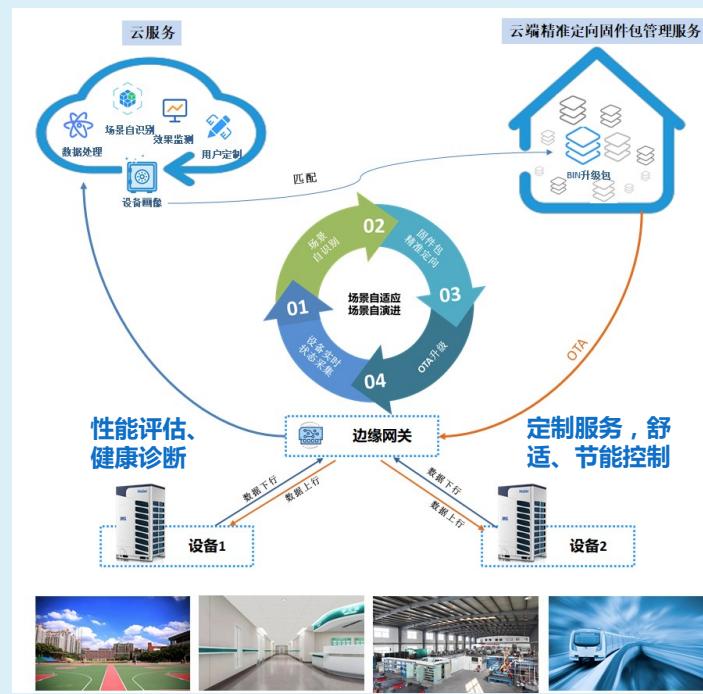
- 变吸气压力控制的EER高于定吸气压力控制
- 负荷率越低、配管越长、室内机同时使用率越高，变吸气压力控制的节能效果越好

[1] 李子爱. 配管对多联机性能的影响及控制策略研究[D]. 北京：清华大学, 2018.



技术发展现状：产品技术

⑤ 基于在线性能监测的物联多联机技术



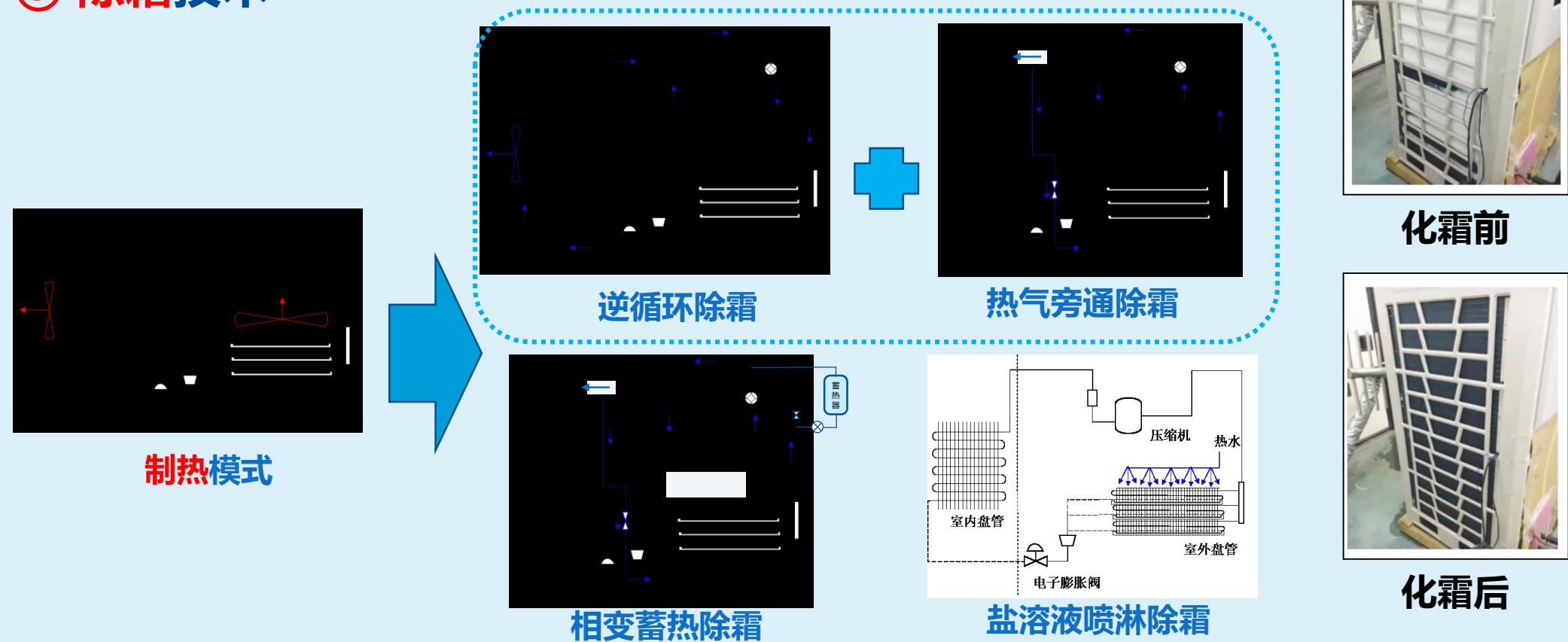
技术进展：

某项目20-21年制冷、制热季节机组监测数据

- 通过**物联网**和**在线性能测量技术**，统计分析每台多联机在实际应用现场的**实际运行性能**
 - 运用**大数据分析**技术，为用户提供**控制程序升级**、**健康诊断**，为个性化服务提供**舒适、节能的运行方案建议**

技术发展现状：产品技术

⑤ 除霜技术



- 多种除霜方式可分为：**内部除霜（制冷剂侧）** 和 **外部除霜（空气侧）**
- 为避免除霜影响室内舒适性，发展出了**蓄热除霜、热气旁通和热气旁通组合除霜**

[1] Air source heat pumps for space heating and cooling, IIR informative note.

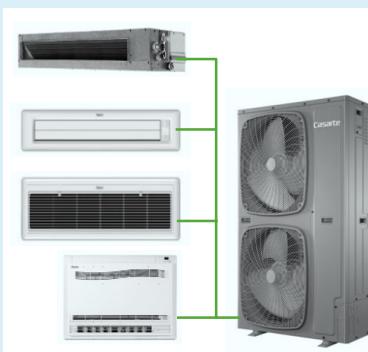


技术发展现状：产品技术

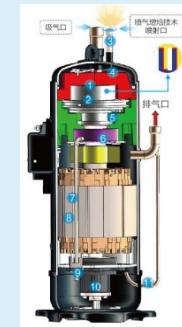
⑥ 高效产品与部件技术、环保制冷剂应用

某品牌多联机性能参数表

型号	RFC252	RFC280	RFC335	RFC400	RFC450	RFC504
制冷量(kW)	25.2	28	33.5	40	45	50.4
制冷功率(kW)	5.6	6.8	8.4	10.9	11.8	14.3
制热量(kW)	27	31.5	37.5	45	50	56.5
制热功率(kW)	5.2	6.3	8	10.3	11.2	13.4
EER/COP	4.5/5.2	4.1/5.0	4.0/4.7	3.7/4.4	3.8/4.5	3.5/4.2
APF	4.95	4.67	4.70	4.55	4.50	4.59



高效户用型多联机产品



恒温除湿风管式室内机

安全回油涡旋压缩机产品



商用高效多联机产品



高落差多联机产品

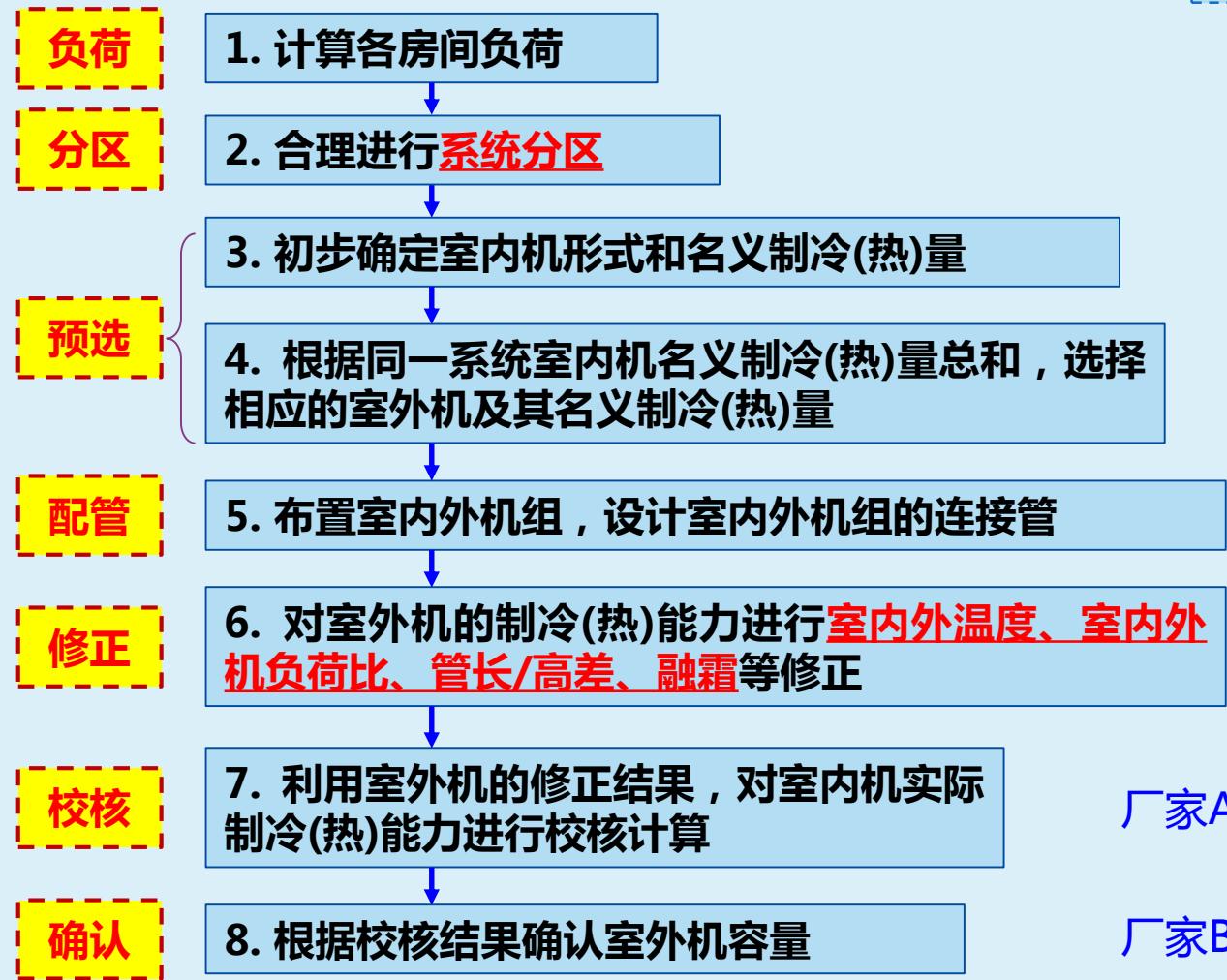


光伏直驱变频多联机组



技术发展现状：设计技术

● 多联机系统设计流程



室外机设计

$$Q_w' = Q_w \cdot (n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 \cdot n_4)$$

室内机设计

$$Q_n = \beta \cdot Q_n'$$

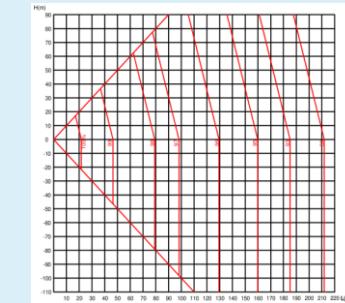
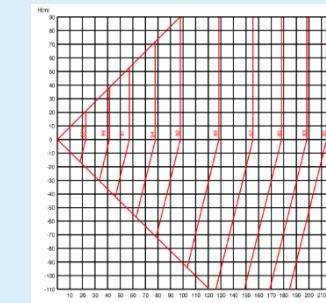
修正系数

管长、高差修正系数：

厂家A

相当配管总长度(米)	20	30	40	50	60	70	80	90	110	130	150
制冷	0.989	0.978	0.967	0.954	0.940	0.925	0.909	0.892	0.878	0.864	0.852
制热	1.0	1.0	1.0	0.99	0.985	0.98	0.975	0.97	0.965	0.96	0.95

室内机和室外机之间的垂直高差	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
衰减系数	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1



厂家B

(制热)除霜修正系数：

室外机的回气温度°CWB	-15	-13	-11	-9	-7	-5	-3	-1	1	3	5
修正系数	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.91	0.88	0.86	0.87	0.92	1

室外环境温度 T4 (°C)	-10	-8	-5	-1	0	3	5	7
化霜修正系数	1	0.98	0.95	0.86	0.85	0.87	0.92	1

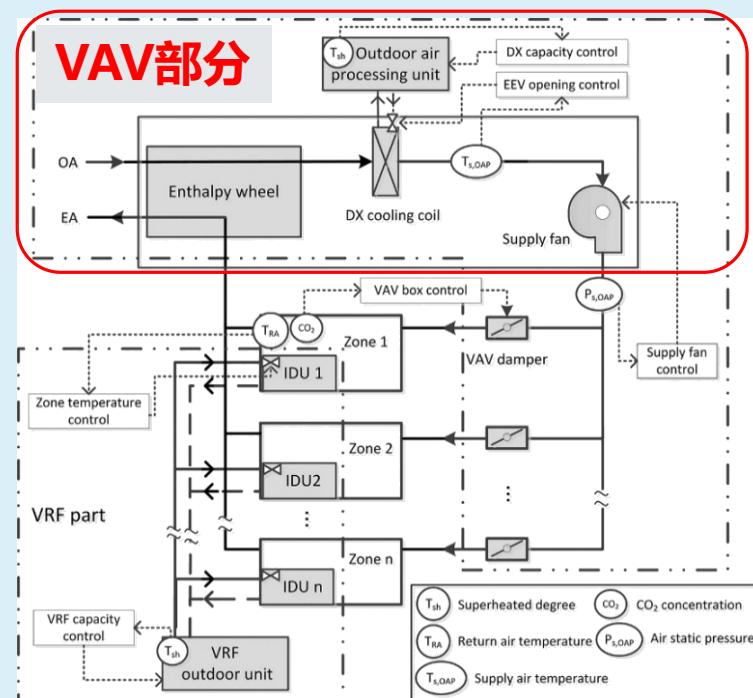
[1] 中国勘察设计协会. T/CECA20016-2022. 多联机空调系统设计应用技术规程[S]. 中国建材工业出版社 , 2022.



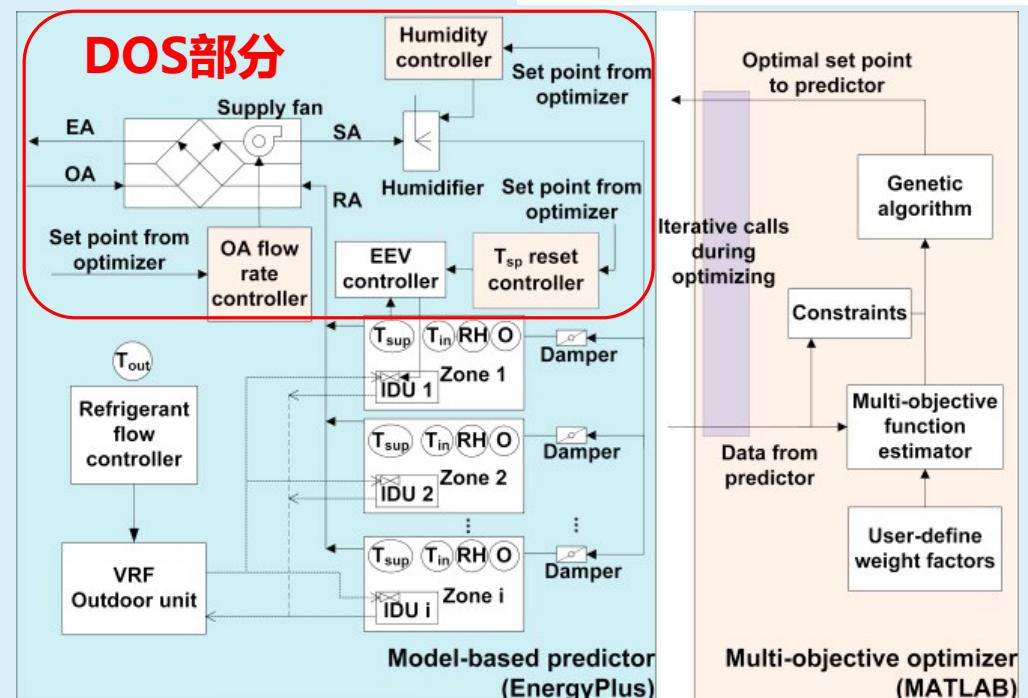
技术发展现状：设计技术

- 多联机与VAV、DOAS系统结合（提供新风）

VRF+VAV (热回收) 系统^[1]



VRF+DOAS系统^[2]



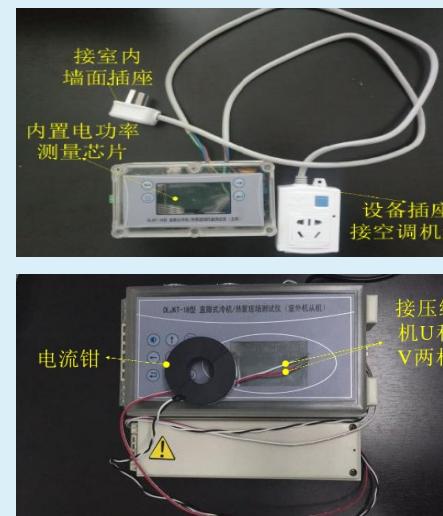
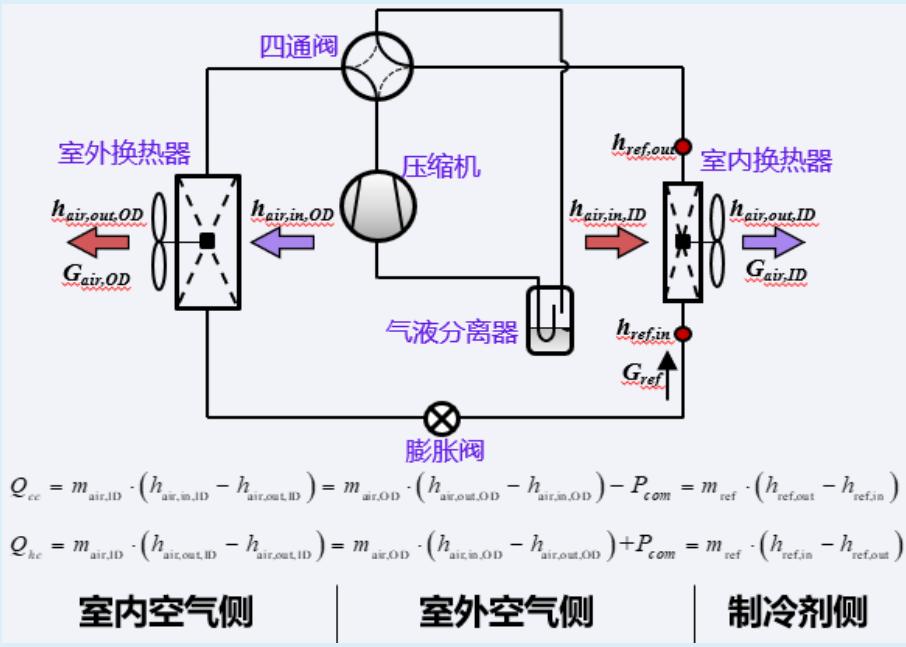
- VRF系统与VAV、DOAS系统结合，可同时处理室内循环风和新风

- [1] Y. Zhu, X. Jin, Z. Du, C. He, Coordinated optimisation of the variable refrigerant flow and variable air volume combined air-conditioning system in heating conditions, Sci. Tech. Built Environ. 21 (7) (2016) 904–916.
- [2] W. Kim, S.W. Jeon, Y. Kim, Model-based multi-objective optimal control of a VRF (variable refrigerant flow) combined system with DOAS (dedicated outdoor air system) using genetic algorithm under heating conditions, Energy 107 (2016) 196–204.

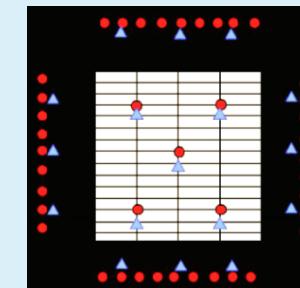


技术发展现状：调适技术

● 多联机现场性能测量技术，为系统性能调适提供必要参数支撑



通过第三方检测，精度均达到1级，制冷与制热能力误差15%以内，全年APF误差10%以内



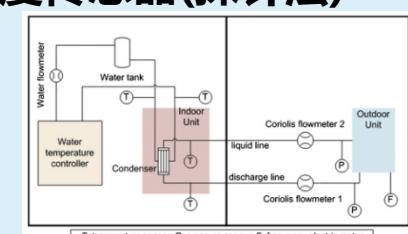
室内布置温/湿度传感器[1]



室外布置温/湿度传感器(探针法)[1]



室外出风采样器[2]



制冷剂流量计[3]

更高的精度 → 更精确的数据 → 更精准的调适

- [1] T. Ichikawa, S. Yoshida, T. Nobe, S. Kametani, Running Performance of Split-type Air Conditioning Systems Installed in School and Office Buildings in Tokyo, *Refrig. Air Cond.* (2008) 1–8.
 [2] H. Yusuke, S. Satoshi, N. Tatsuo, Actual performance Evaluation System of package Air-Conditioner by Sampling System of Heat Rejection Flux from Outdoor Unit, Part1 : A Prototype Specification of Sampling System of Heat Rejection Flux from Outdoor Unit, in: *Proc. Air Cond. Sanit. Eng. Soc. Meet.*, 2006.
 [3] C.T. Tran, P. Rivière, D. Marchio, C. Arzano-Daurelle, Refrigerant-based measurement method of heat pump seasonal performances Performances, *Int. J. Refrig.* 35 (2012) 1583–1594.

技术发展现状：调适技术

● 多联机健康诊断技术，为系统性能调适提供必要前提和保障

常见故障类型

制冷剂充注不足

制冷剂过量充注

空气侧污垢

阀门故障

温度传感器故障
(脱离)

温度传感器故障
(不准)

液体回流

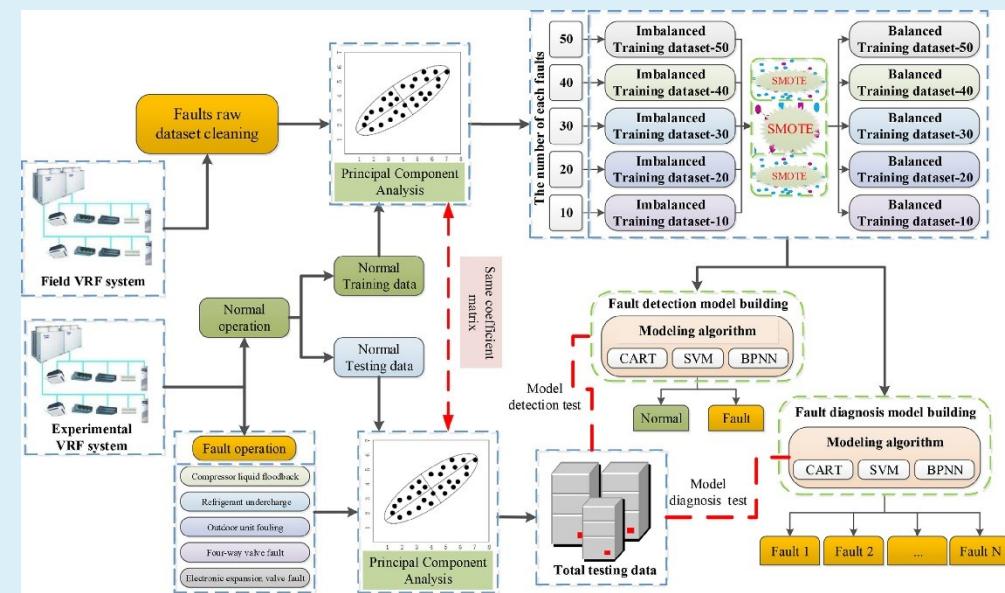


制冷剂泄漏



蒸发器结霜

- 构建模型法（基于质量、能量守恒，但精度不高）
- 知识经验法（建立故障诊断经验准则）
- 数据驱动法
(可以与知识经验法相结合，以提高VRF系统的故障诊断策略的准确性、可行性和快速性)



[1] Zhou Z , Chen H , Li G , et al. Data-driven fault diagnosis for residential variable refrigerant flow system on imbalanced data environments[J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 125(1).



技术发展现状：调适技术

● 多联机实际运行能效的调适方法（只有多联机企业才能实现）

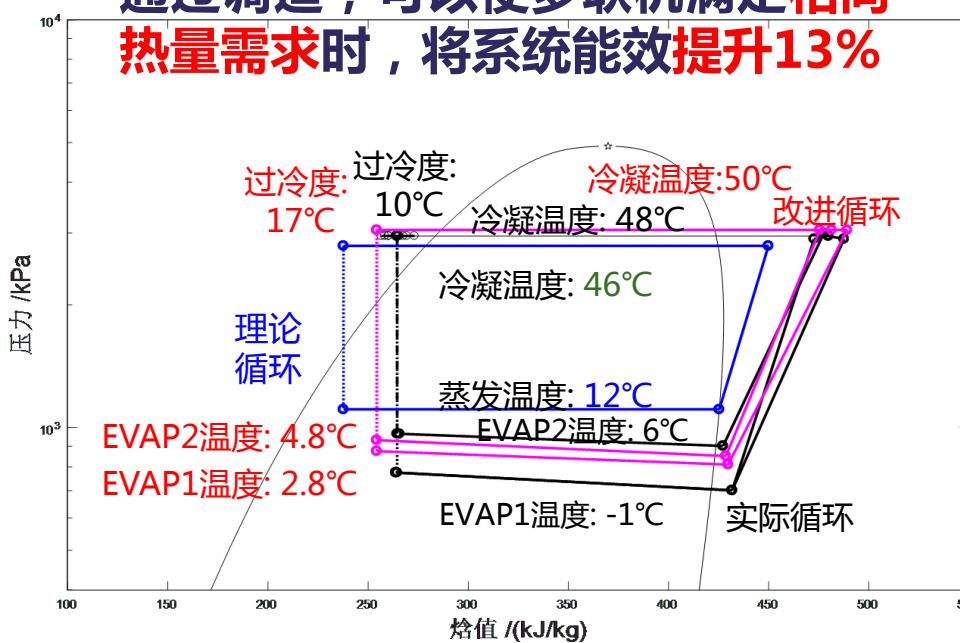
□ 途径1：提升单个部件性能

- ✓ 基于**理想部件性能**，确定其与调适目标COP的差距，寻找提升能效的着力点

□ 途径2：改善部件匹配关系

- ✓ 基于**实际系统性能**，改变系统可调参数，在满足同样需求时，提升系统能效

通过调适，可以使多联机满足**相同热量需求时**，将系统能效**提升13%**



	压缩机耗电量 kW	风机耗电量 kW	系统耗电量kW	COP_{comp}	COP_{sys}	COP_{theory}	$\frac{COP_{sys}}{COP_{theory}}$
实际循环	11.5	1.8	13.3	3.5	3.0	5.8	0.52
改进循环	9.8	2.2	12.1	4.1	3.4	6.0	0.56

[1] 张国辉. 办公建筑中多联机制冷(热)量测量方法及运行特性研究[D]. 北京：清华大学, 2019.



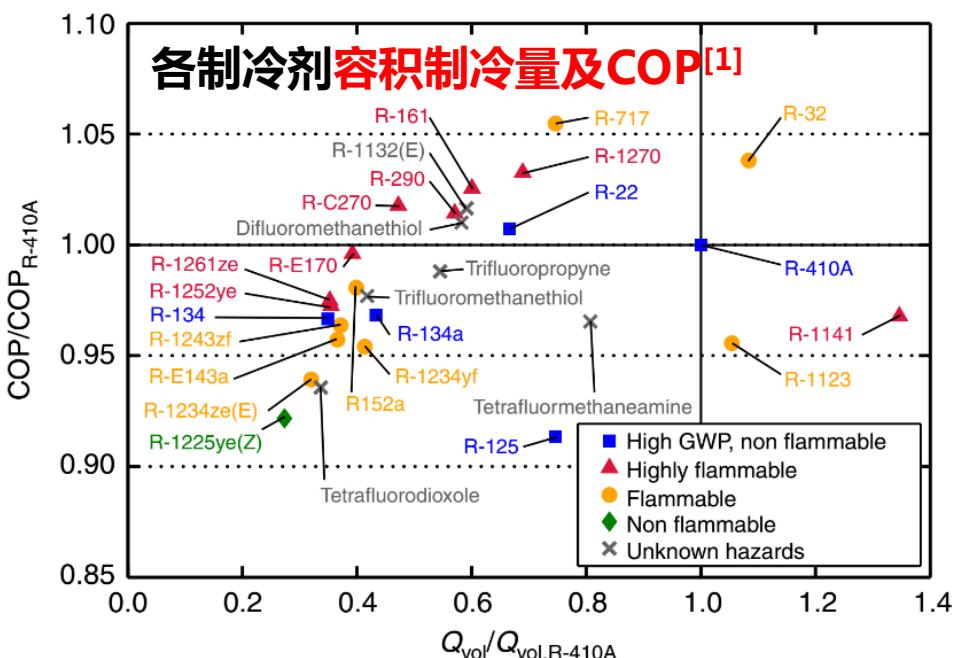
主要内容

- 多联机产业现状
- 技术发展现状
- 存在的主要问题
- 多联机发展方向
- 结束语



主要问题：① 制冷剂替代与减量化

● 制冷剂替代及低GWP工质应用



- 目前多联机的制冷剂**R410A**，老旧系统也有**R22**

纯工质替代物：

- R290**：运行压力和容量与R22相近，且能效比高于R22，但由于易燃性，主要适用于小充注量系统
- R32**：运行压力和容量接近R410A，且能效也与R410A相当，甚至略高于R410A，目前在**分体机、多联机**中已有使用，但其为可燃，必须解决**安全性**问题
- R744**：CO₂跨临界循环在**高温热水制取**方面具有显著优势，但在供暖和供冷领域的应用受到限制(**制冷性能、承压**)

混合制冷剂：

- 主要由**两种或多种**R32、R125、R134a、R152a、R161、R1234yf、R1234ze、R600a、R1270和R290等纯工质混合构成。某些混合工质已被命名为专有编号，如R444B、R446A、R447A
- 这些混合工质**GWP在150~1000之间**，可燃性多为**1级（高GWP工质）**或**2L级（中GWP工质）**

[1] McLinden M O , Brown J S , Brignoli R , et al. Limited options for low-global-warming-potential refrigerants. Nature communications, 2017, 8:14476.

主要问题：② 性能衰减

影响实际性能的因素众多

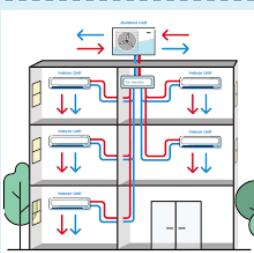
负荷特征

- 室外实际温/湿度变化与实验室不同



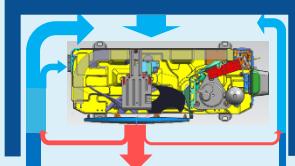
管长高差

- 现场配管长度/高差导致阻力，影响性能



气流短路

- 短路导致冷凝温度升高、蒸发温度降低



结霜除霜

- 结霜、除霜、回油运行影响实际能效



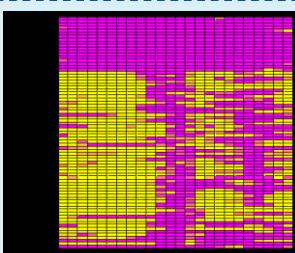
机器故障

- 压缩机磨损、换热器脏堵等故障



用户行为

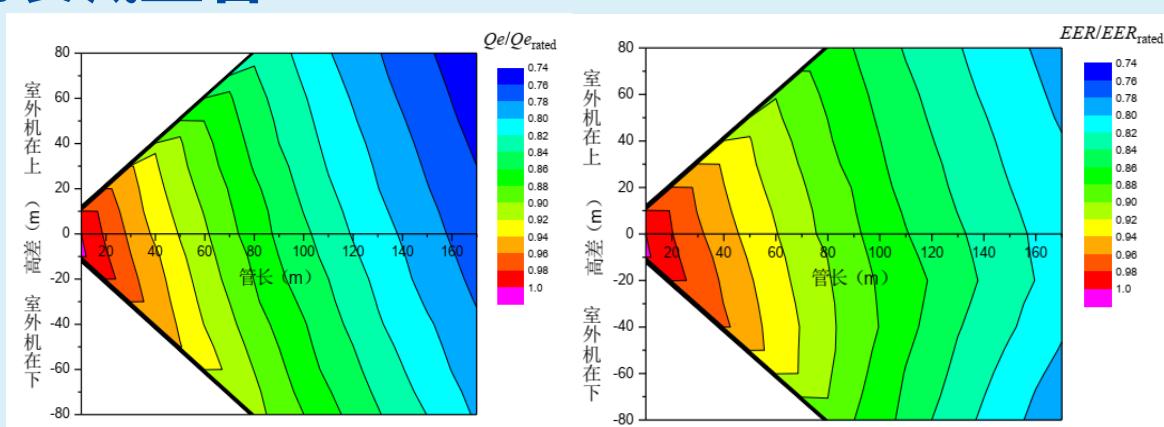
- 实际设定温度/风量/运行时间影响性能



● 单个系统容量大、管路长、性能衰减显著

对配管长度和室内、外机之间高差的研究表明：

- 高差为0m, 配管长由10m增至170m时：
制冷量衰减至77%↓, EER衰减至81%↓
- 室外机在上, 管长和高差为80m时：
制冷量衰减至83.8%↓, EER衰减至86.9%↓
- 室外机在下, 管长和高差为80m时：
制冷量衰减至90.7%↓, EER衰减至89.9%↓



[1] 李子爱.配管对多联机性能的影响及优化控制策略研究[D]. 清华大学博士论文, 2018.

制冷量衰减^[1]

EER衰减^[1]

主要问题：② 性能衰减

● 低温制热性能差

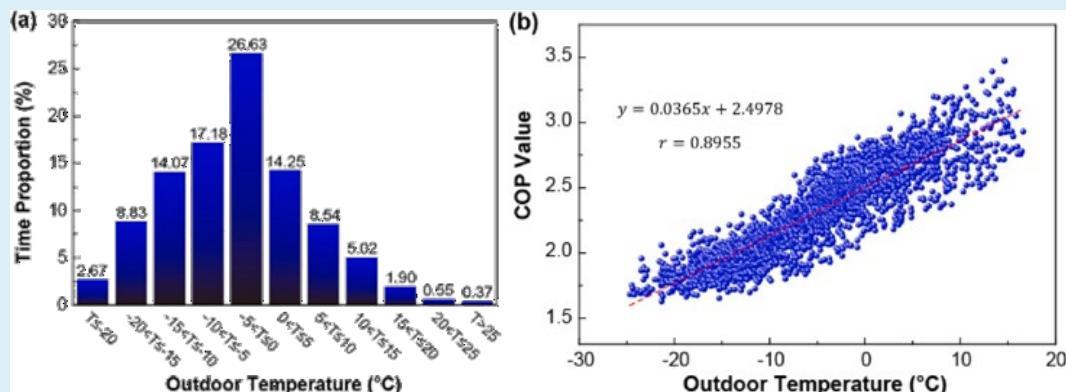
黑龙江大庆某建筑风冷热泵实测结果表明：

- 测量期室外温度分布范围：**-24.7°C~15°C**，对应COP分布：**1.63~3.47**
- 冬季室外温度对热泵的供热能力有**显著影响**，COP随室外温度的**降低而下降**

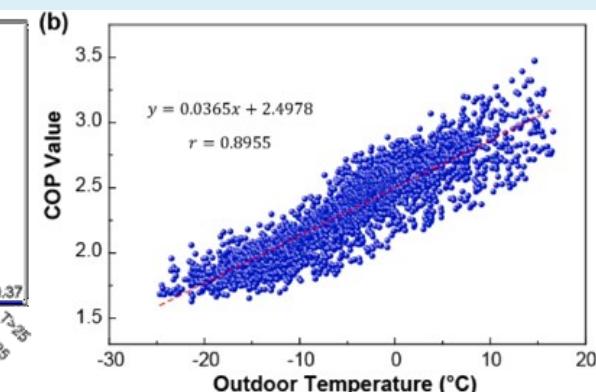
● 除霜性能衰减

对两种除霜方式的性能测量结果表明：

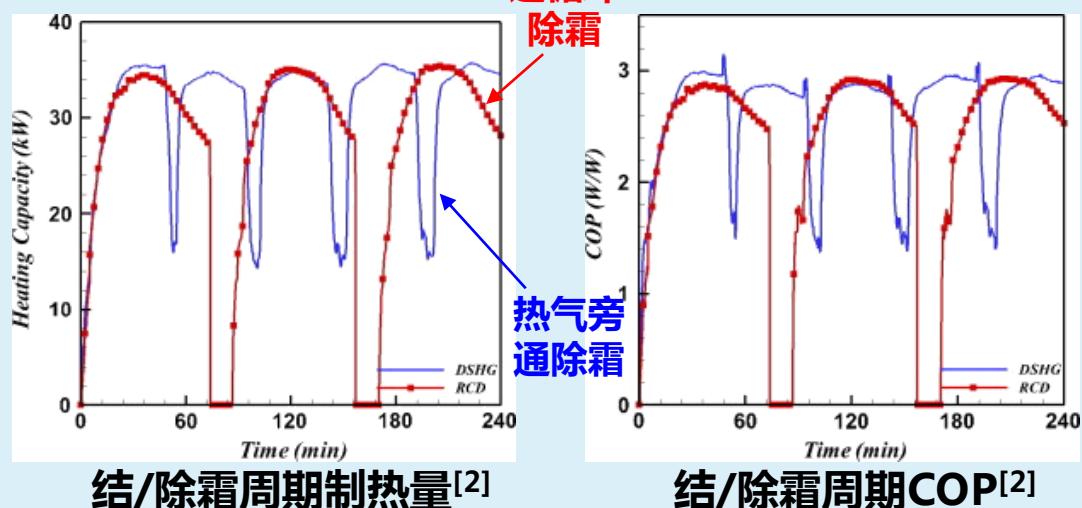
- 结/除霜过程导致制热中断，**系统性能、能效下降**
- **逆循环除霜**：除霜**5min**+恢复制热**10min**, 室内温度下降**2~5°C**, **热气旁通除霜**：除霜**10min**，除霜制热量为名义工况**50%**，除霜更频繁



大庆冬季温度分布^[1]



实测COP^[1]



结/除霜周期制热量^[2]

结/除霜周期COP^[2]

[1] Wu C , Liu F , Li X , et al. Low-temperature air source heat pump system for heating in severely cold area: Long-term applicability evaluation[J]. Building and environment, 2022(Jan.):208.

[2] Ji Y , Hhb A , Sjl A , et al. Continuous heating of an air-source heat pump during defrosting and improvement of energy efficiency[J]. Applied Energy, 2013, 110:9-16.

[3] 张国辉. 办公建筑中多联机制冷(热)量测量方法及运行特性研究[D]. 清华大学博士论文, 2022.



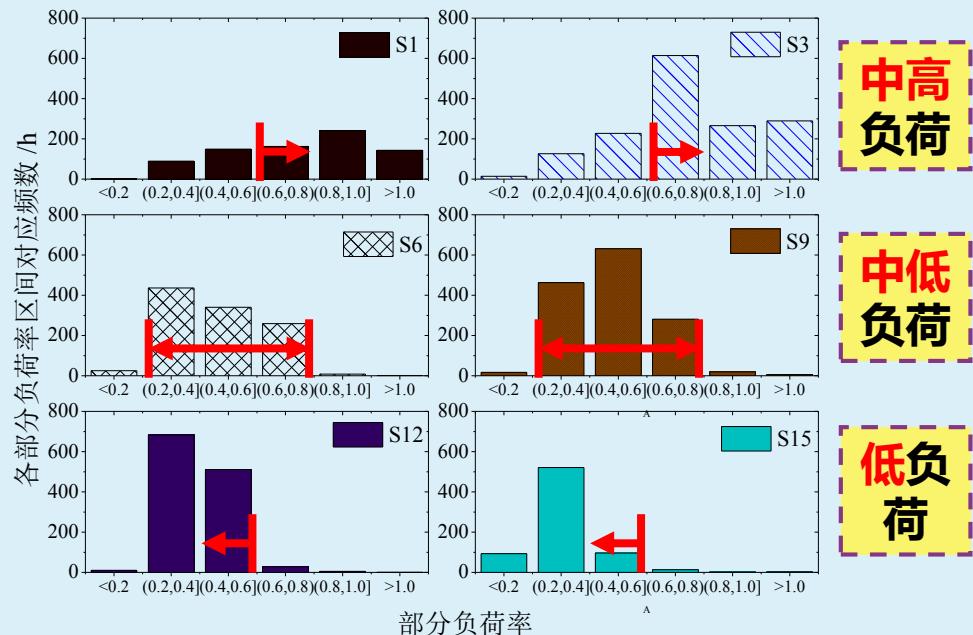
主要问题：③ 系统设计

- 系统设计分区方法不明确，部分负荷性能差

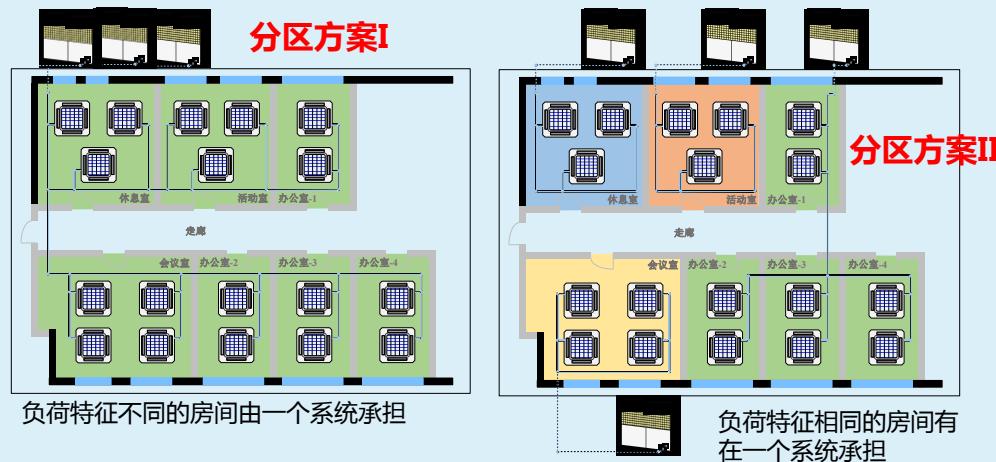
对不同地区多套多联机性能实测结果表明：

- 多联机实际运行**负荷率差异大**，不少多联机存在**实际运行负荷率过低**的问题，导致性能很差
系统分区设计、容量设计不合理，是导致低负荷运行的重要因素

厂家/标准	分区原则
厂家A	不同朝向、使用时间有差异的房间划分为一个系统
厂家B	使用时间不一的房间分为一个区域（如将会议室、办公室、员工休息室、活动室等房间并入一个系统）
厂家C	同一系统设置在同一层或同一区域 相同使用时间的房间设计在同一系统
JGJ174-2010 多联机空调系统工程技术规程 ^[5]	负荷特性相差较大的房间或区域，宜分别设置多联机空调系统



唐山某办公建筑6套多联机制热季节负荷率分布^[1]



[1] 张国辉. 办公建筑中多联机制冷(热)量测量方法及运行特性研究[D]. 清华大学博士论文, 2022.



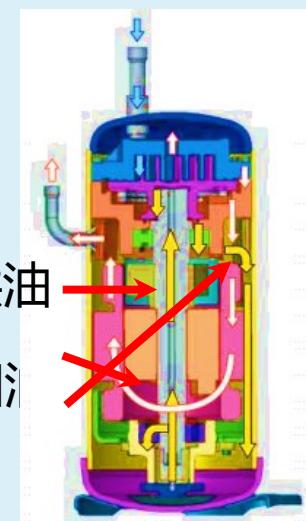
主要问题：④ 系统回油

● 系统回油

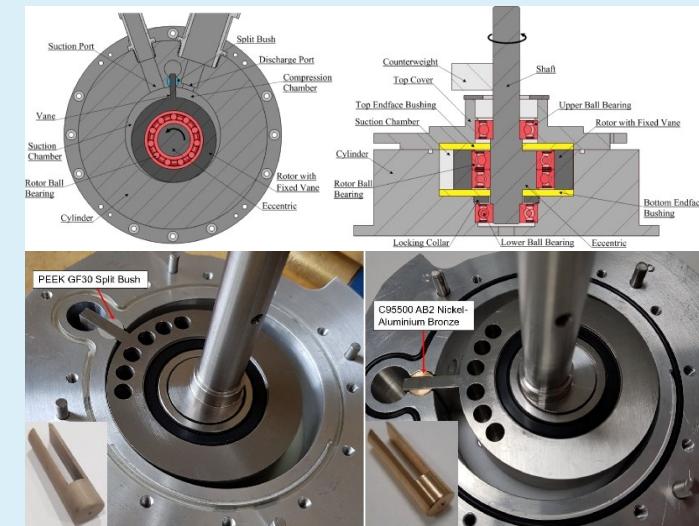
性能实测结果表明：

- 为避免压缩机缺油，多联机须频繁回油运行，导致**能耗增大**
- **最小回油速度限制多联机系统的室内外机容量配置率不宜过高(通常1.0~1.3)**，难以突破**1.5**

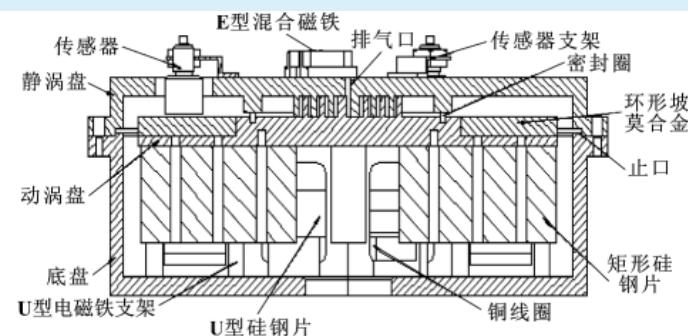
发展无油压缩机技术，既能减少回油能耗，又能提高未来多联机系统配置率，减少低负荷运行时间



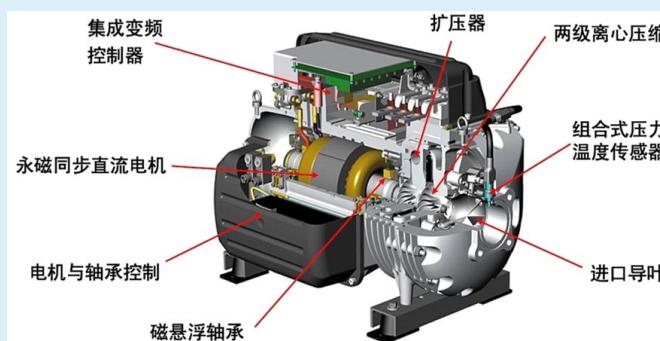
涡旋压缩机剖面图



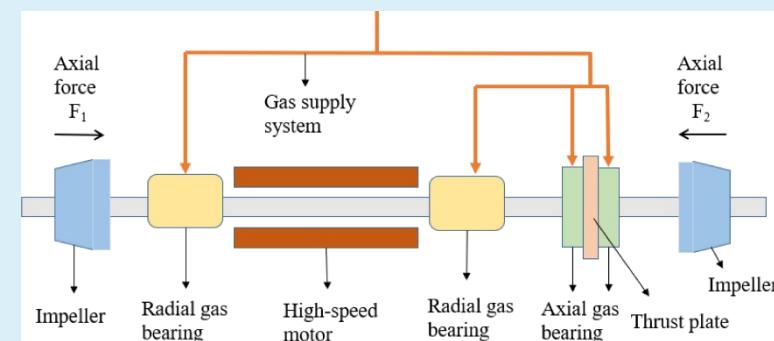
无油摆动叶片压缩机结构^[3]



磁悬浮涡旋压缩机结构^[1]



某磁悬浮离心压缩机结构^[2]



某气悬浮离心压缩机结构^[2]

[1] 孙兴伟,窦汝桐,孙凤,王可,金俊杰.磁悬浮驱动式无油涡旋压缩机驱动力分析[J].机床与液压,2017,45(19):92-96+44.

[2] Yi K, Zhao Y, Yu G, et al. Research on performance of refrigeration centrifugal compressor with gas bearings for water chillers[J], Energy Reports, 2022(8), 5562-5569.

[3] Heng K R , Ooi K T , Weng K C . Experimental study of an oil-free swing vane compressor. 2021.

主要内容

- 多联机产业现状
- 技术发展现状
- 存在的主要问题
- 多联机发展方向
- 结束语



未来发展方向

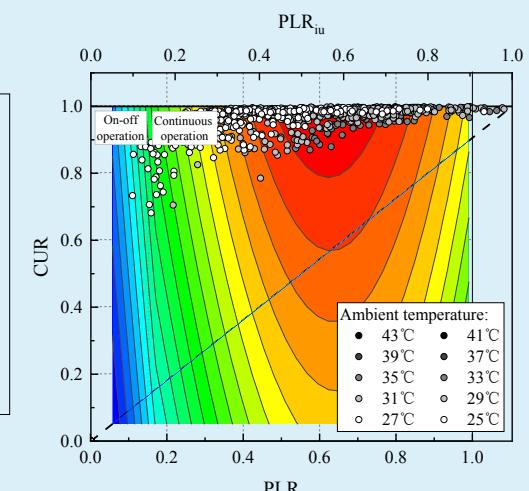
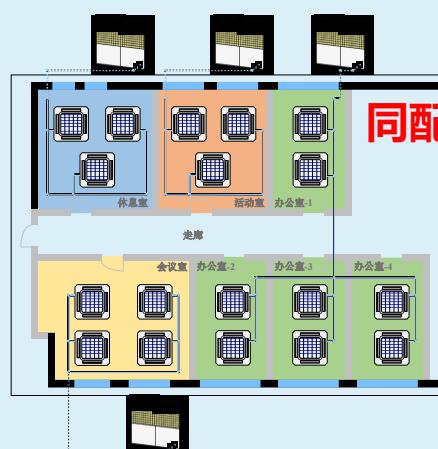
① 制冷剂替代与减量

- 考虑采用R32作为替代工质；研发低GWP的混合工质；最终发展自然工质(CO₂)
- 单个系统容量小型化，减少制冷剂充注量



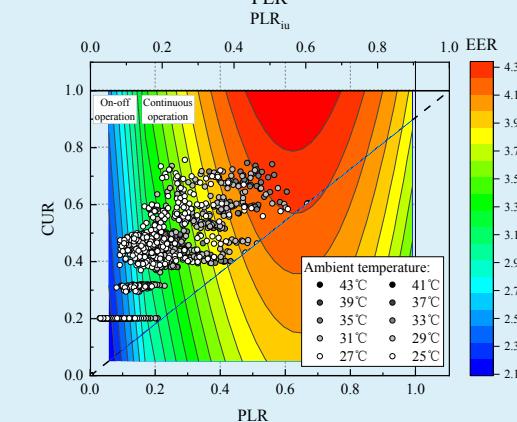
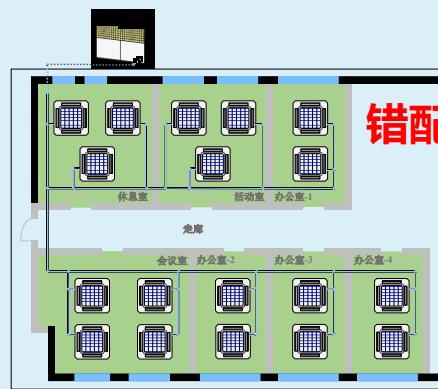
② 系统设计优化

- 探明系统分区设计原则，提升系统实际性能
- 基于实际性能，优化系统容量设计、部件匹配，提升实际能效
- VRV系统与VAV、DOAS系统结合，利用室外新风（自然能源）处理室内空气



③ 高效回油技术

- 发展高效回油、无油压缩机技术，既减少回油能耗，又提高多联机系统配置率，减少低负荷运行时间



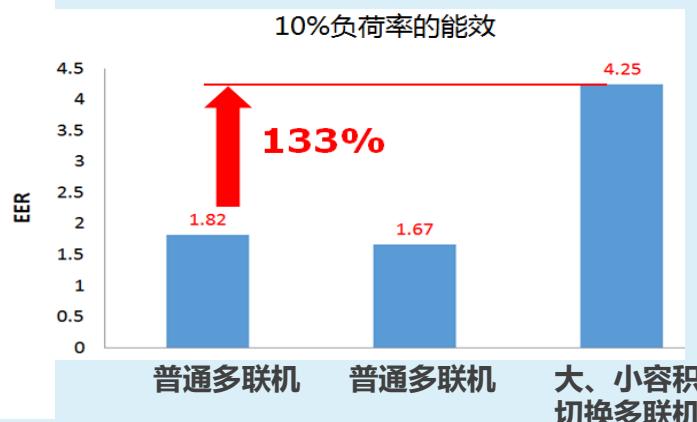
未来发展方向

④ 运行能效COP提升

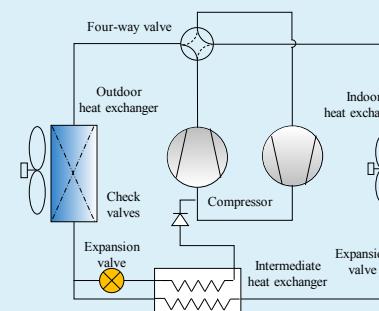
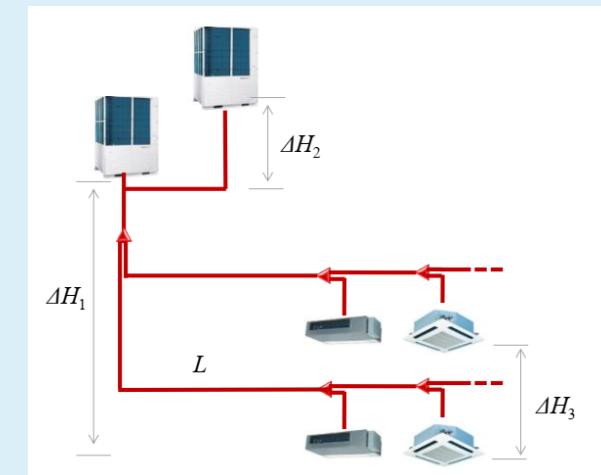
产品研发

- 提高小负荷率的能效比，解决低负荷能效低下问题
- 采用(准)双级、复叠系统，提升低温性能，推动多联机在北方严寒地区的应用

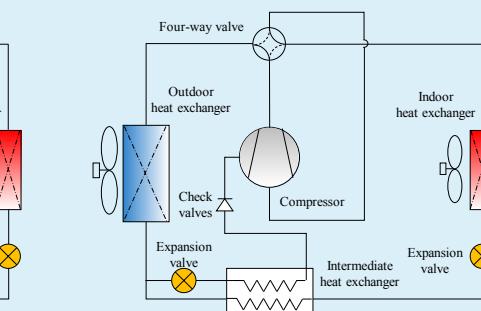
系统设计：避免室内外机连接管长、高差过大



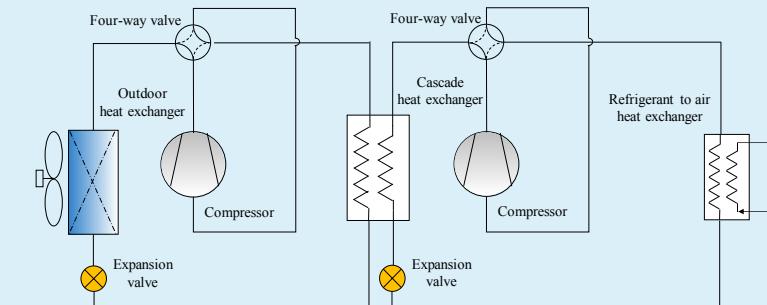
基于大小容积切换压缩机技术的8~16kW家用多联机



IHX双级压缩系统^[1]



IHX准双级压缩系统^[1]



复叠循环系统^[1]

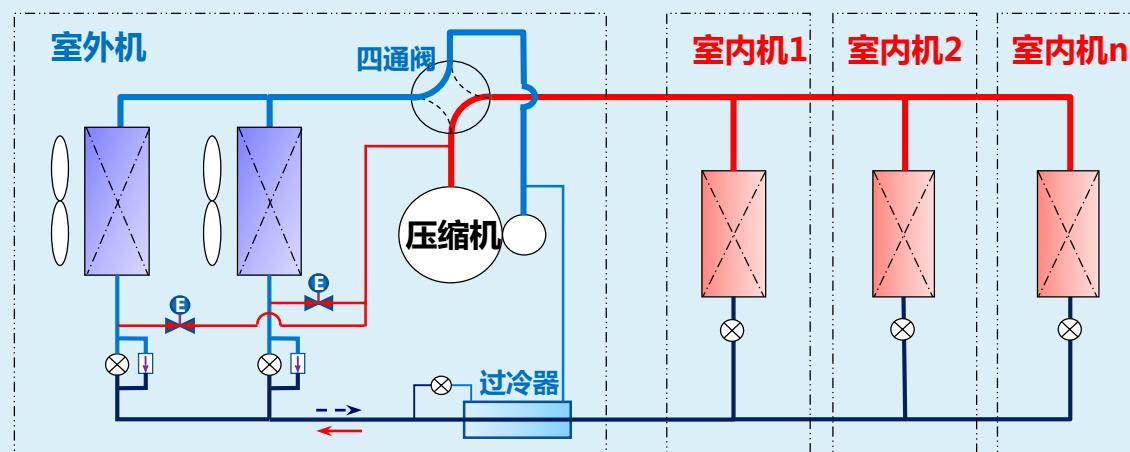
[1] Air source heat pumps for space heating and cooling, IIR informative note.



未来发展方向

④ 运行能效COP提升

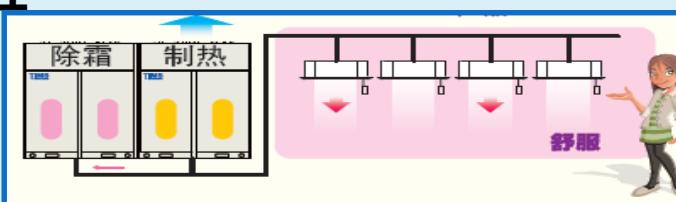
➤ 继续改善除霜性能，降低除霜能耗，**不间断供热除霜**



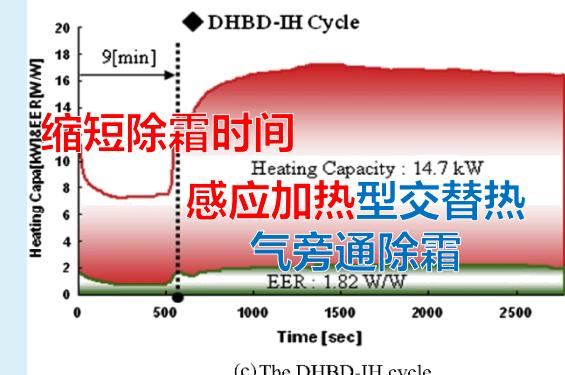
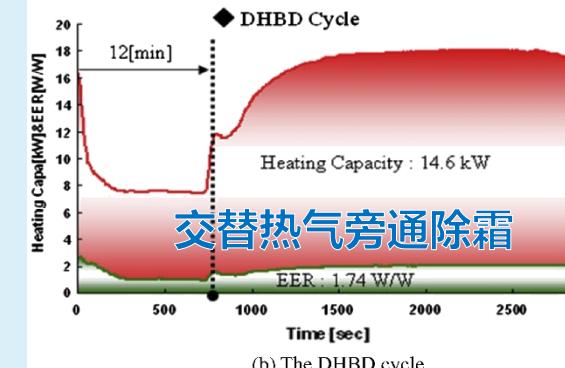
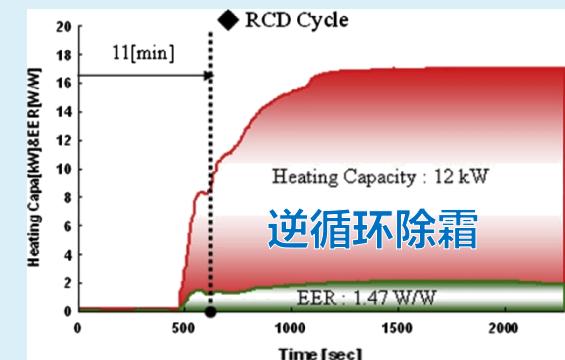
- 采用新冷媒循环流程**交替热气旁通除霜**，实现**不间断制热除霜**，提高室内舒适性和系统稳定性

- 除霜周期延长，制热量增大
➤ 除霜过程制热量衰减小

- 除霜效果：室外干/湿球温度=1/0.5°C



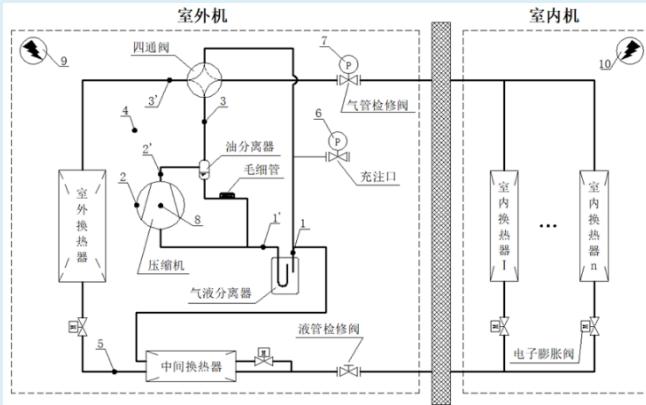
技术方案	除霜时间间隔	除霜周期内最大制热量	除霜周期内平均换热量	改进效果
现有多联机	60min	60.0kW	52.6kW	制热量提升
新循环多联机	82min	64.3kW	58.1kW	10%



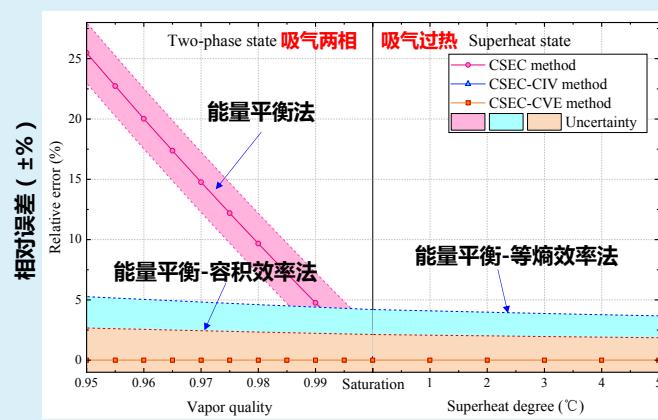
未来发展方向

⑤ 智能运维：基于在线性能测量的优化控制、运行调适和健康诊断（体检和诊断）

- 推动系统节能控制策略的研究和开发
- 了解用户实际需求，为用户提供个性化服务
- 为产品在线健康诊断提供支撑，实现在线性能调试，提高售后服务质量
- 让用户了解实际性能，及时进行节能改造

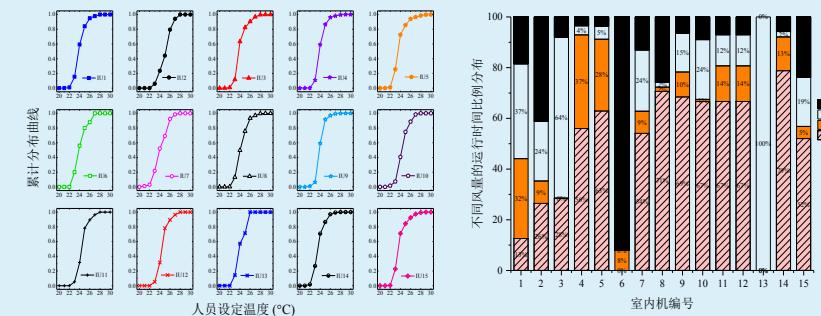


多联机在线性能测量技术



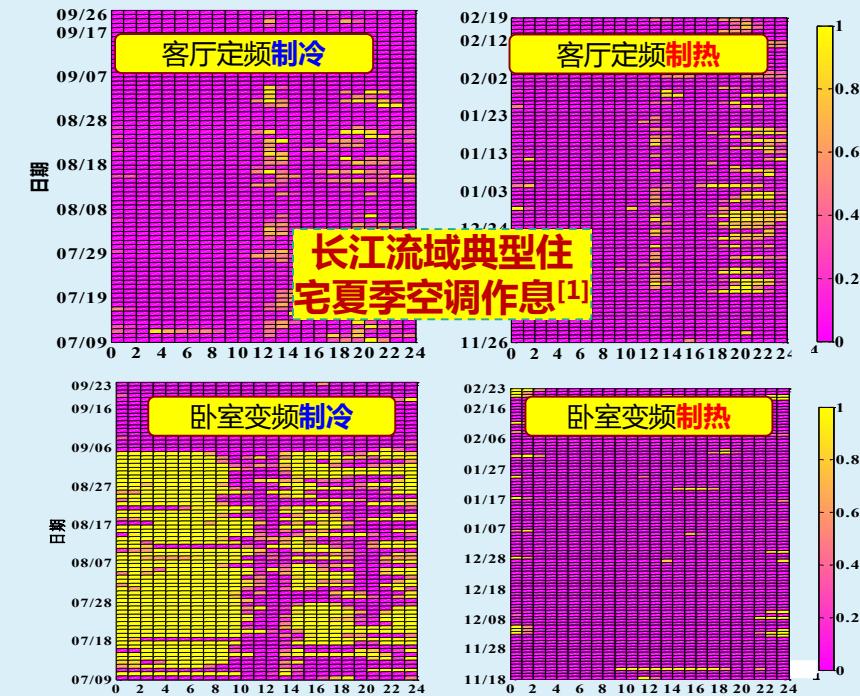
多联机在线性能测量方法^[1]

- [1] Yang Z, Ding L, Xiao H, et al. All-condition measuring methods for field performance of room air conditioner[J]. Applied Thermal Engineering, 2020:115887.
[2] Xiao H, Shi J, Yang Z, et al. Precision improvement method for onsite performance measurement of variable refrigerant flow system[J]. Building and environment, 2022(208-Jan.).



夏季设定温度偏好：24°C

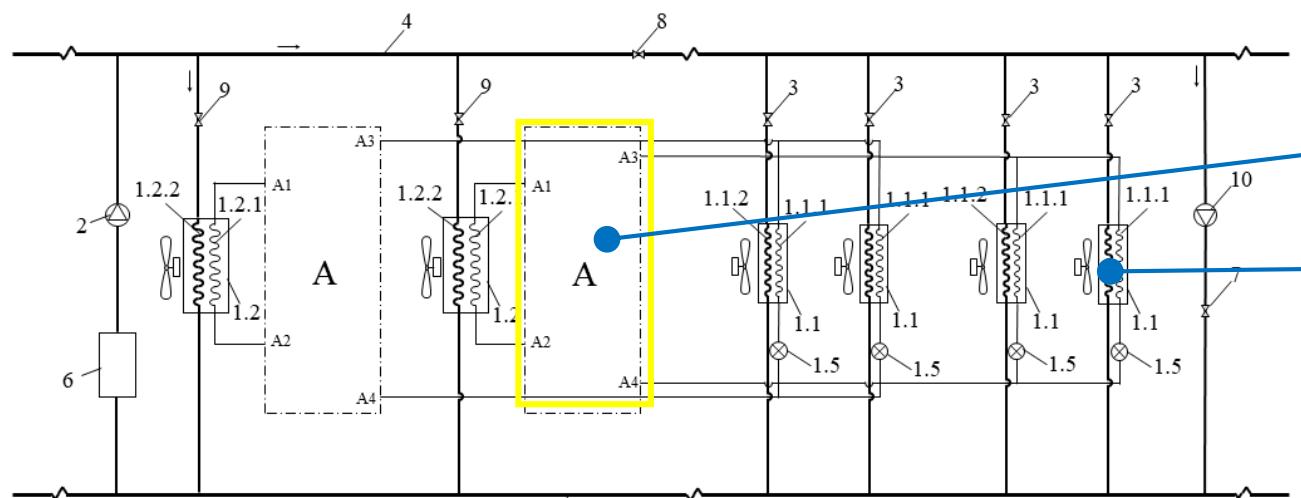
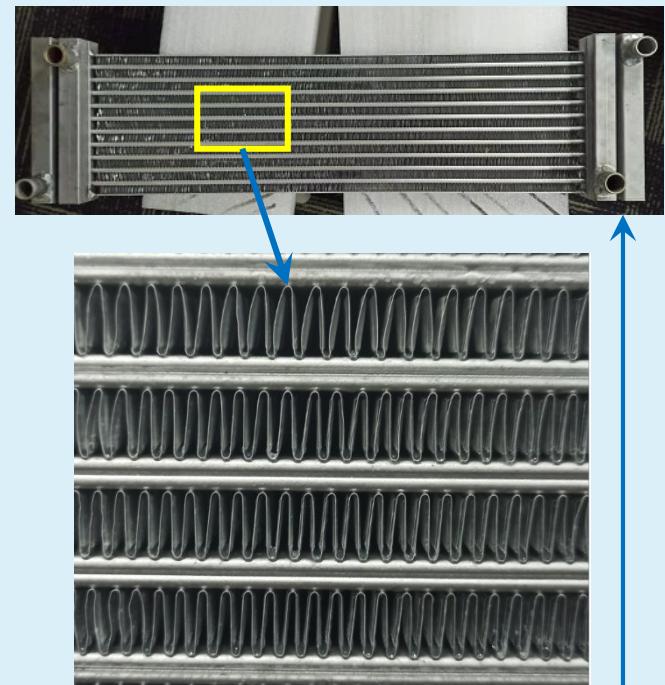
夏季设定风量偏好：低风



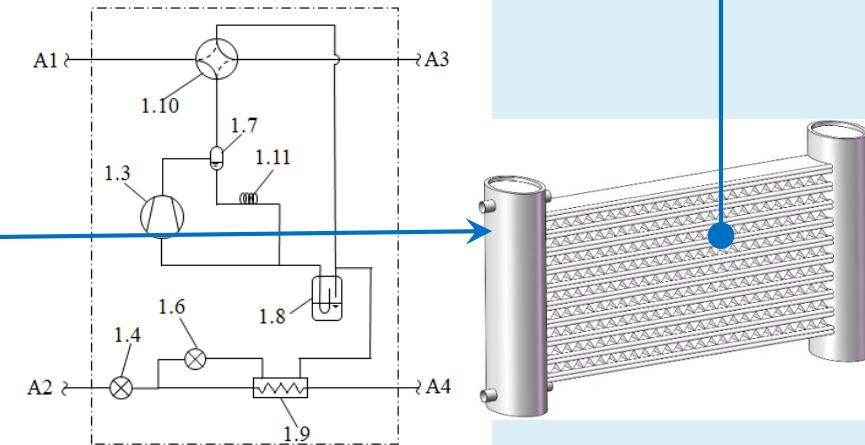
未来发展方向

⑥ 系统循环和结构创新

- 采用三介质换热器做室内机，以载冷剂环连接多个小容量系统，代替多模块的制冷剂回路连成一个大系统：1) **减少**每个系统的制冷剂充注量；2) **解决低负荷率效率低问题**（冷热量调度）；3) **减小**多联机的配管长度、高差导致的**性能衰减**；4) **解决了舒适性问题**（室内机+地暖）
- 多个模式下高效运行：**空气源多联机、水源多联机、免费供冷、直接供热、冷热量调度模式**



复合热源多联机系统^[1]



部件A详细结构

三介质换热器

[1] 石文星, 肖寒松, 姜思航, 等. 一种多模式水环多联机空调系统; CN210267538U[P]. 2020.

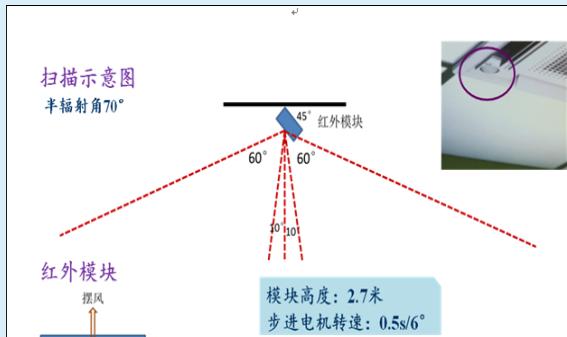


未来发展方向

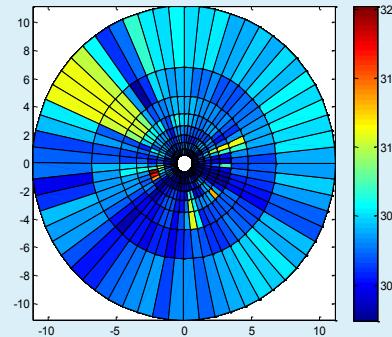
⑦ 兼顾舒适性改善、能效提升技术

● 非均匀环境营造技术（部分时间、局部空间）

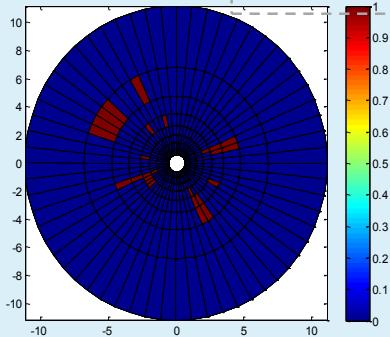
- 采用**红外传感器和小波分析技术**，将人员位置、状态信息传递到空调控制器，智能控制空调**定向送风**（调整摆风角度、风速、出风温度），营造**非均匀环境**
- 实现快速制冷/热，提高房间内**人体舒适性**
- 实时检测人员位置，实现**人来开机、人走关机的行为节能**
- 在**办公建筑多联机中应用**，实测节能率为**14%~32%**



人体感知模块安装示意图



环境温度值分布



人体位置信号



人体感知传感器



活动量增加，空调功率增加



风避人吹

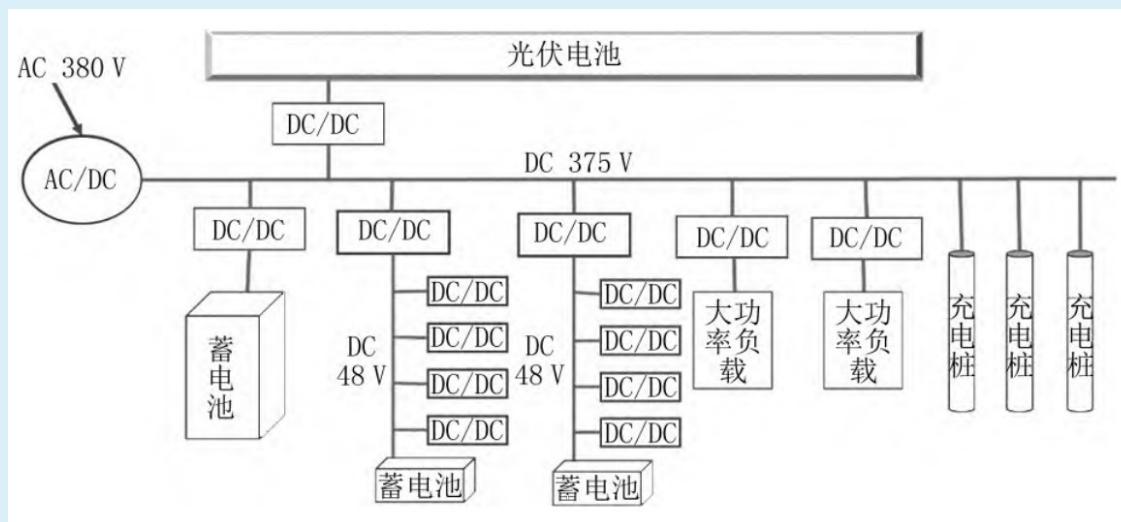
风随人动

[1] 青岛海尔空调电子有限公司、青岛海尔空调电子有限公司.

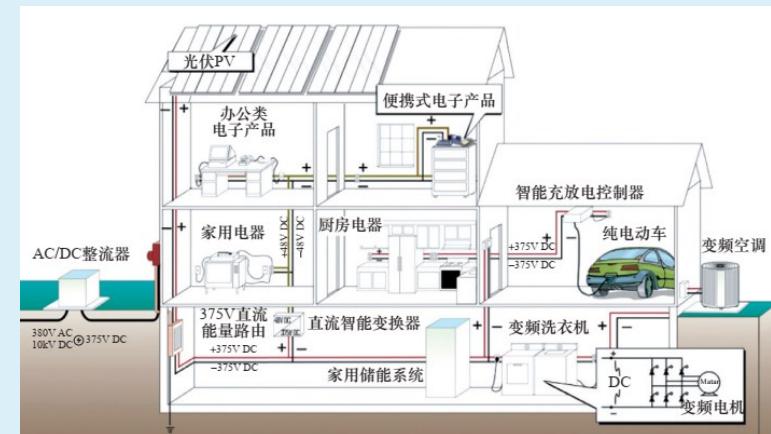
未来发展方向

⑧ 为碳中和技术发展，提供数据支撑

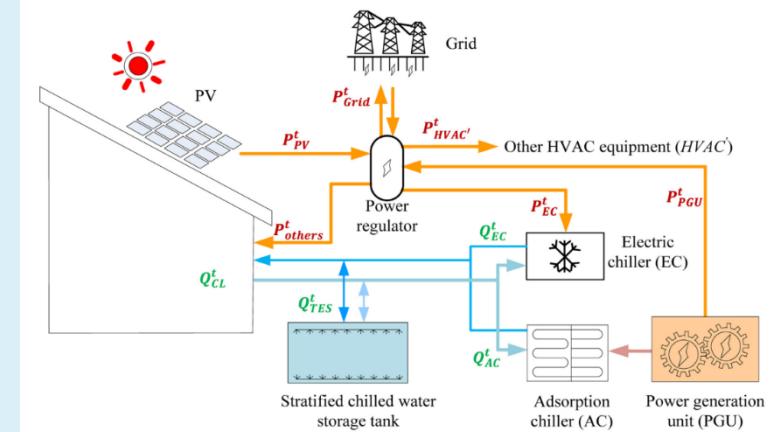
- 为建筑能源管理提供重要依据
- 为建筑“光储直柔”技术的发展提供电量预测的数据，实现需求侧相应控制



建筑光储直柔配电系统原理^[1]



新型光储直柔配电系统^[2]



基于模型预测控制的建筑能源调度系统^[3]

[1] 江亿. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统[J].暖通空调,2021,51(10):1-12.

[2] 李叶茂, 李雨桐, 郝斌, 罗春燕. 低碳发展背景下的建筑“光储直柔”配用电系统关键技术分析[J]. 供用电, 2021,38(01):32-38.

[3] Zhao Y, Lu Y, Yan C, Wang S. MPC-based optimal scheduling of grid-connected low energy buildings with thermal energy storages[J].Energy and Buildings, 2015;86: 415-426.



结束语

- 我国多联机行业**产业大、产品类型丰富**，多联机产量占据中央空调市场**销售额近一半**，奠定了其举足轻重的市场地位
- 多联机空调系统近年在**产品技术、设计技术、调适技术**方面取得了一定进展，然而，其结构特点（长配管、高落差、制冷剂充注量大）也为多联机的可持续发展提出了挑战
- 在低碳发展的要求下，全行业都应加强科学的研究和技术开发工作，应重点在**冷媒替代与减量、系统设计优化、能效提升、系统结构创新、舒适性改善**等方向上推动多联机快速、健康发展
- 最后，感谢各多联机产品研发生产企业，研究设计机构，以及多联机用户对多联机行业做出的重要贡献！



谢谢各位专家！

清华大学 建筑技术科学系 石文星

wxshi@tsinghua.edu.cn

2023年1月14日 · 青岛

