

基于能碳双控目标的高效复合式 冷热源方案探讨

上海建筑设计研究院有限公司 朱学锦

目 录

- 1、空调冷热源能碳双控背景
- 2、常见热源特点
- 3、高效低碳复合式冷热源方案
- 4、案例
- 5、结语



空调冷热源能碳双 控背景

空调供热用能电气化趋势

□ 双碳路线对建筑用能的要求

- ✓ 能源结构：提高非化石能源比重，2060年80%以上
- ✓ 终端电气化：2060年建筑领域达到90%

□ 《城乡建设领域碳达峰实施方案》2022年住房和城乡建设部、国家发展改革委

- ✓ 2030年建筑领域碳排放达峰，2060年绿色低碳转型
- ✓ 因地制宜推进地热能、生物质能应用，**推广空气源等各类电动热泵技术**
- ✓ 建筑供暖、生活热水、炊事等向**电气化发展**，到 2030 年建筑用电占建筑能耗比例超过 65%
- ✓ 开展新建公共建筑全面电气化，到 2030 年**电气化**比例达到20%

□ 《2024—2025年节能降碳行动方案》2024年国务院，国发(2024)12号

- ✓ 有序引导天然气消费
- ✓ 结合城市更新行动，推荐**热泵机组、冷水机组**等更新升级



图1 一次能源消费结构

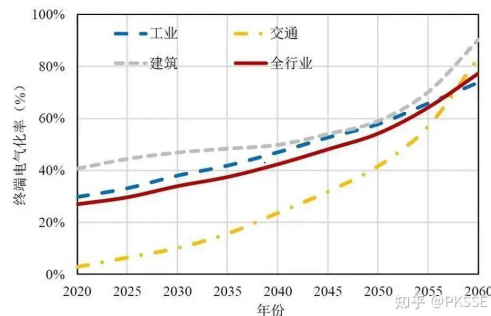


图2 全国及分行业终端电气化率

数据来源：泛能源大数据与战略研究中心

电网碳排放因子对空气源热泵碳排放量影响

□ 全国电网平均碳排放因子变化趋势

- ✓ 2020年0.6101kg/kwh
- ✓ 2021年0.5839kg/kwh
- ✓ 2022年0.5703kg/kwh
- ✓ 2035年0.347kg/kwh (预测)

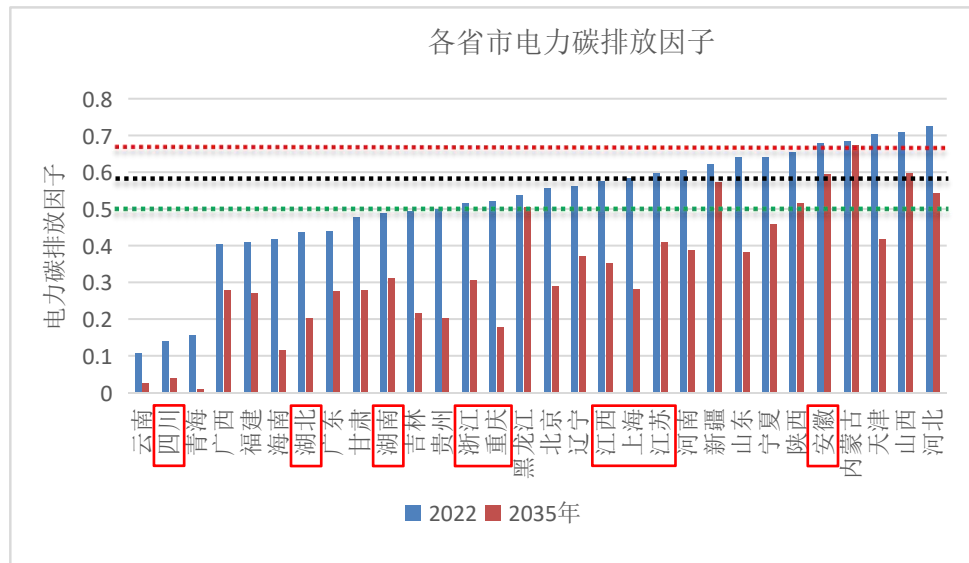
□ 夏热冬冷地区空气源热泵碳排放量与燃气锅炉对比

- ✓ 2022年空气源热泵碳排放量大部分省市低于燃气热水锅炉
- ✓ 2035年空气源热泵碳排放量均少于燃气热水锅炉

夏热冬冷地区燃气热水锅炉与空气源热泵碳排放量

	气温	热效率 /能效	碳排放因子 kgCO ₂ /kwh
燃气热水锅炉		92%	0.20 (热量)
空气源热泵	7℃	COP 3.2	0.67
	0℃	COP 2.8	0.58
	-6℃	COP 2.4	0.50

说明：1kwh的供热量碳排放量均为0.208kgCO₂



- 空气源热泵COP3.2碳排放量=燃气热水锅炉碳排放量，0.67kgCO₂/kwh
- 空气源热泵COP2.8碳排放量=燃气热水锅炉碳排放量，0.58kgCO₂/kwh
- 空气源热泵COP2.4碳排放量=燃气热水锅炉碳排放量，0.50kgCO₂/kwh

2035年碳排放因子数据来源：中国区域电网二氧化碳排放因子研究2023报告

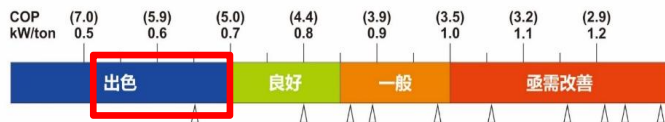
高效低碳冷热源发展与现状

□ 高效制冷系统的发展

- ✓ 起步：2019年七部委政策《绿色高效制冷行动方案》
- ✓ 标准完善：设计、评价、控制系统等
- ✓ 全国发展情况：夏热冬暖地区→夏热冬冷地区、寒冷地区
- ✓ 全年COP提升：5.0→6.5
- ✓ 上海市既有建筑绿色低碳更新改造适用技术目录：COP5.1

□ 复合冷热源发展趋势

- ✓ 夏热冬暖局部地区：高效制冷系统+空气源热泵
- ✓ **夏热冬冷地区：高效制冷系统+空气源等热泵供热**
- ✓ 寒冷、严寒地区：高效制冷系统+市政供热+热泵供热



□ 上海地区公共建筑冷热源现状及发展

序号	公共建筑冷热源常见形式	特点及发展
1	电制冷+蒸汽锅炉	1990-2010年，燃油、燃气供热能耗及碳排放大
2	电制冷+蒸汽锅炉+蒸汽型溴化锂冷水机组	用电量小，缓解用电紧张供热能耗及碳排放大
3	电制冷+直燃型溴化锂冷热水机组	用电量小，缓解用电紧张供热能耗及碳排放大，
4	直燃型溴化锂冷水机组	用电量最小；缓解用电紧张，平衡冬夏季用气
5	电制冷+燃气热水锅炉	2010年后大量使用
6	空气源热泵	配电量大，中型项目使用较多（2010年前）
7	多联机空调	配电量大，大量中小型项目使用
8	高效制冷+空气源热泵	2020年左右使用越来越多，全电空调

高效低碳冷热源设计现状

□ 新建建筑冷热源系统容量配置问题：

- ✓ 冷水机组承担全部冷负荷：空气源热泵供热不供冷；能耗小、碳排放量小，投资大（图 1）
- ✓ 冷水机组承担部分冷负荷：空气源热泵供热、全容量供冷，冷水机组承担剩余冷量；能耗大、碳排放量大，投资小（图 2）

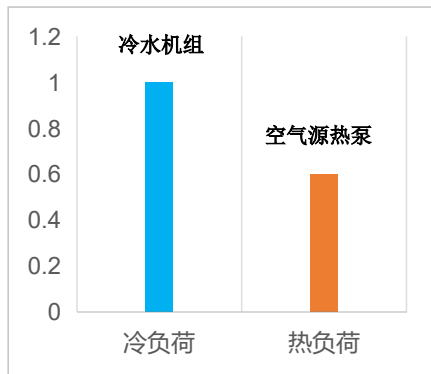


图 1

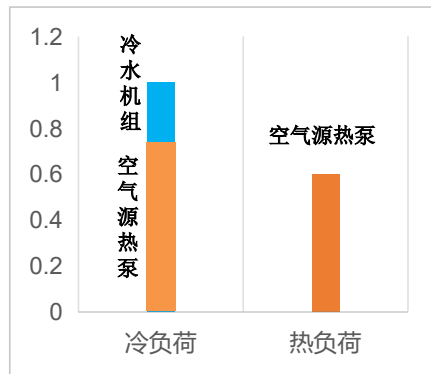


图 2

□ 既有建筑改造供热方式问题：

- ✓ 电制冷→高效制冷系统
- ✓ 供热→燃气热水锅炉，考虑节能但未考虑低碳供热

序号	公共建筑冷热源形式	改造方案
1	电制冷+蒸汽锅炉	高效制冷+燃气热水锅炉 生活热水改用空气源热泵 热水机组
2	电制冷+蒸汽锅炉+ 蒸汽型溴化锂冷水机组	
3	电制冷+直燃型溴化锂 冷热水机组	
4	直燃型溴化锂冷水机组	
5	电制冷+燃气热水锅炉	



常规热源方案特点

燃气热水锅炉供热特征

特点:

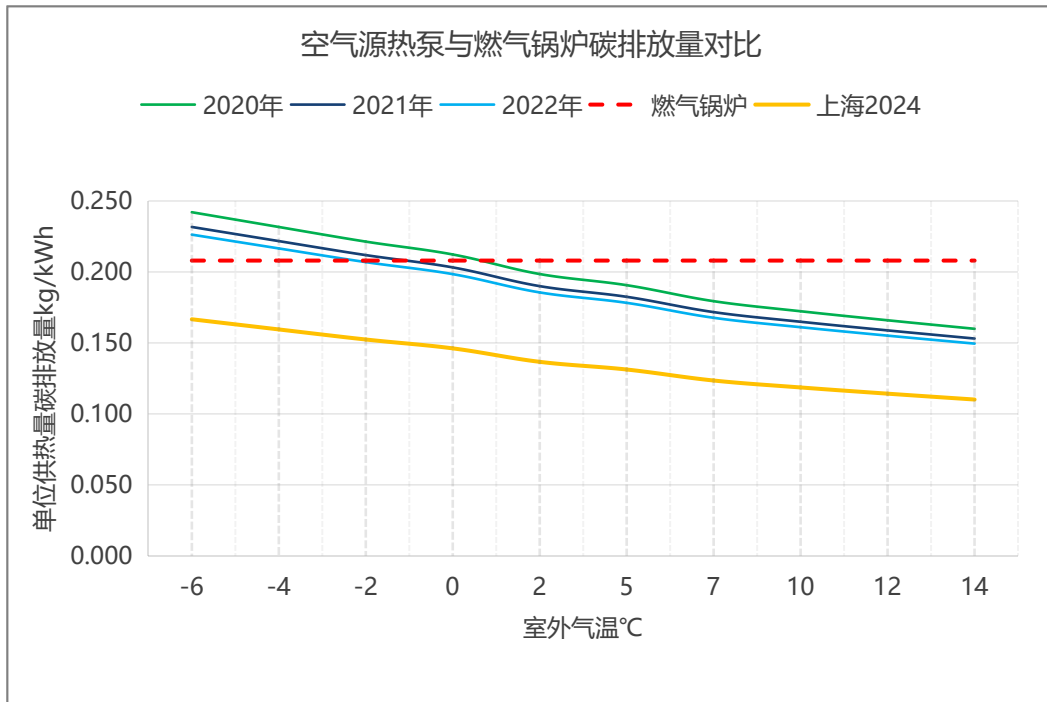
- 供热稳定: 与气候无关
- 供热品质高: 热水温度高
- 配电功率小
- 设备价格低

缺点:

- 燃气费用高
- 电网碳排放因子低时, 碳排放量高于空气源热泵

应用情况:

- 既有公共建筑改造: 原有燃气供热系统
- 供热可靠性高建筑: 医院建筑、宾馆建筑
- 复合供热: +空气源热泵



空气源热泵供热特征

特点:

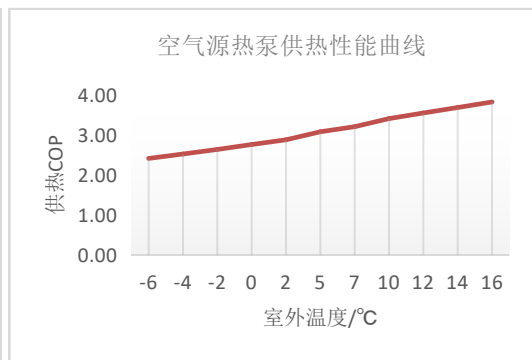
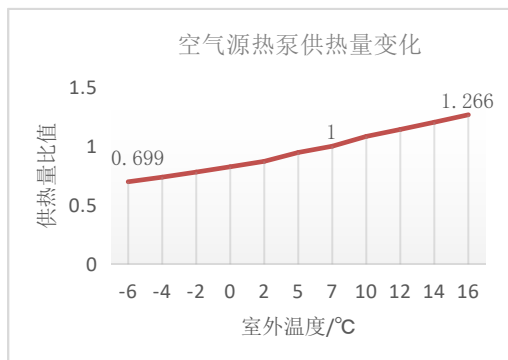
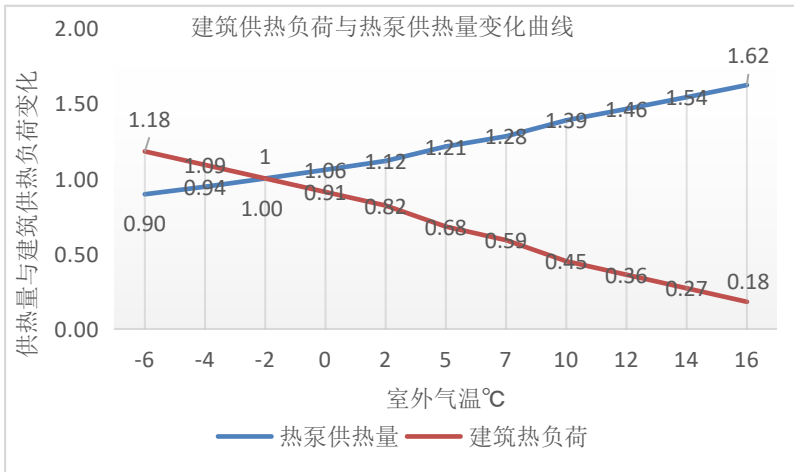
- 一机两用：夏季供冷、冬季供热
- 电网碳排放因子低时，供热碳排放量小于燃气锅炉
- 运行费用小于燃气锅炉

缺点:

- 制热量、能效受气温影响
- 供热量与建筑供热负荷需求反向变化
- 供冷COP低于水冷却冷水机组：3.2~3.6——6.0

应用情况:

- 新建建筑、既有公共建筑改造
- 独立供热
- 复合供热：空气源热泵+其他热源



多联机空调系统

特点:

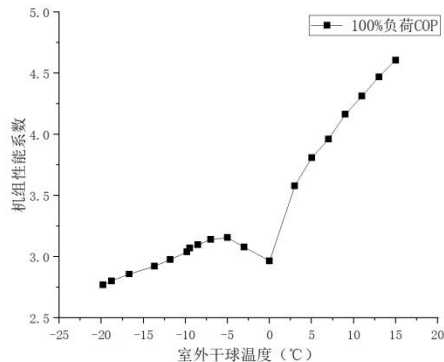
- 一机两用：夏季供冷、冬季供热
- APF值5.2-6.25, IPLV(C)高达10.2
- 能效高于空气源热泵, 碳排放量、运行费用小于空气源热泵
- 使用灵活, 适用空调需求多样场所

缺点:

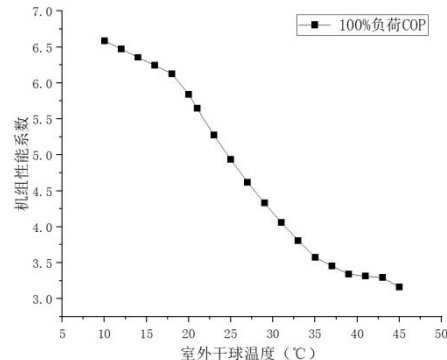
- 制热量、能效受气温影响
- 供冷COP低于水冷却冷水机组: 3.4~3.8——6.0

应用情况:

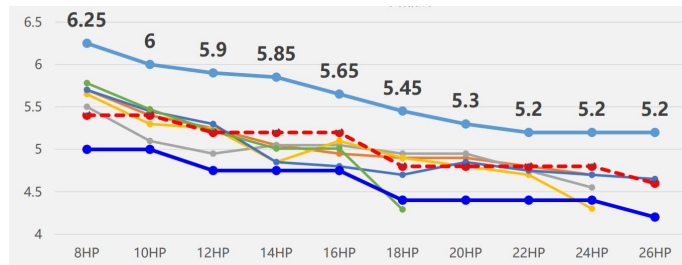
- 适用加班需求办公建筑
- 复合供热: 多联机+其他热源 (空气源热泵、燃气热水锅炉)



多联机空调制热COP曲线

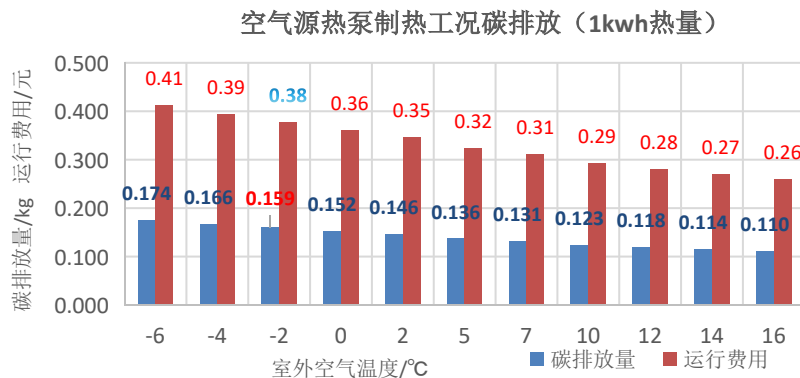
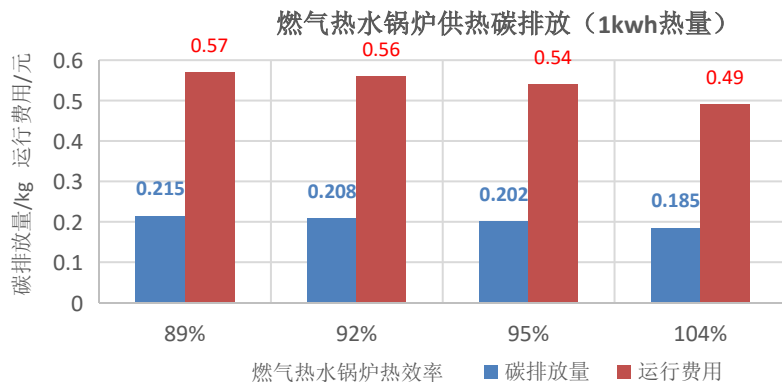


多联机空调制冷COP曲线



国内多联机空调APF

各种供热方式碳排放量及运行费用比较



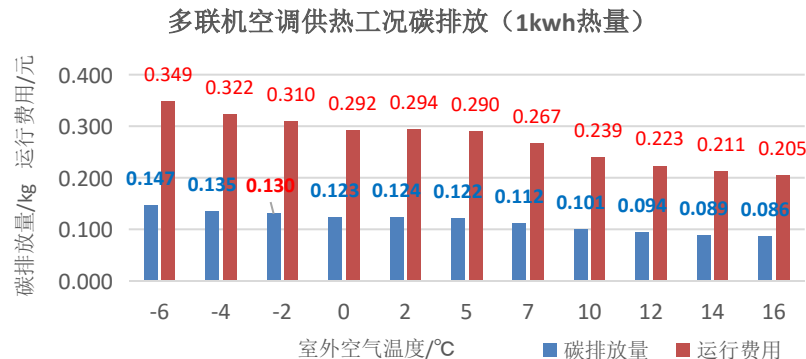
碳排放：多联机<空气源热泵<燃气热水锅炉<电蓄热锅炉

电蓄热碳排放（1kwh热量）

- ✓ 碳排放量0.43kg
- ✓ 运行费用0.31元

计算依据：天然气碳排放因子0.20kgCO₂/kwh，2022年上海电力碳排放因子0.42kgCO₂/kwh

天然气价格5.0元/Nm³，电价1元/kWh





高效低碳复合式冷 热源方案

空气源热泵复合供热方案比较

□ + 燃气热水锅炉:

- ✓ 空气源热泵优先运行：低碳
- ✓ 热水锅炉提升供水温度
- ✓ 热水温度推荐范围：40℃~55℃，低于燃气锅炉
- ✓ 配电量小
- ✓ 控制逻辑：回水温度控制
- ✓ 适用于既有建筑改造项目，供热可靠性高的场合，如医院、高等级宾馆等

□ 连接方式选择原则：串联、并联、串并联

1. 满足空调系统负荷变化特征
 - ✓ 定供水温度、变流量：气温不变、室内负荷变化
 - ✓ 变供水温度、变流量：气温变化、室内负荷变化
2. 根据空气源热泵、燃气锅炉的负荷承担比例

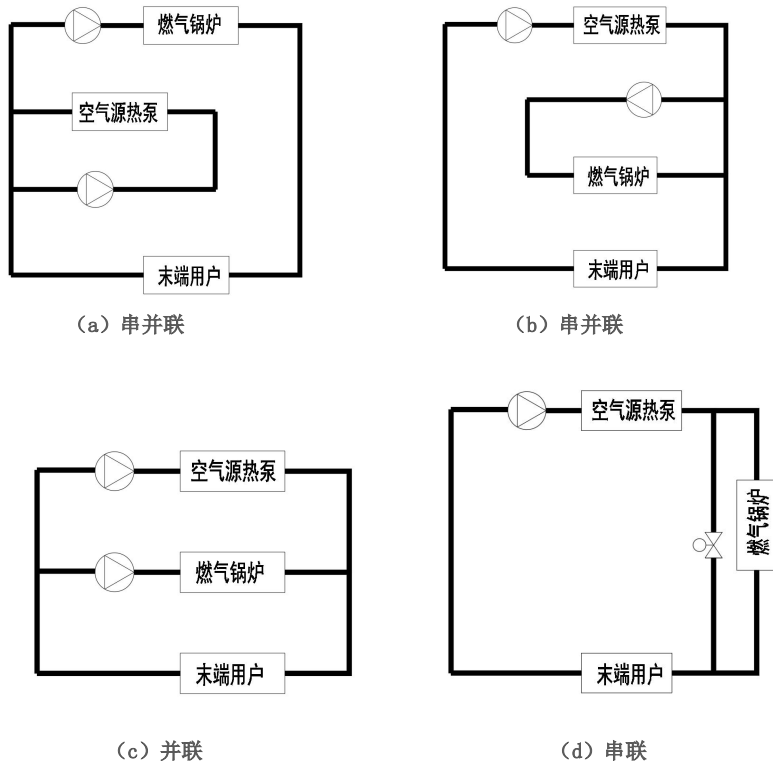


图1 空气源热泵+燃气热水锅炉系统简图

空气源热泵复合供热方案比较

□ + 水源热泵复叠供热

- ✓ 构成：空气源热泵、水源热泵、冷却塔
- ✓ 空气源热泵冬季低水温运行：25~30℃
- ✓ 水源热泵夏季供冷，冬季供热（50~60℃）
- ✓ 空气源热泵夏季供冷、冬季供热、复叠供热
- ✓ 复叠供热工况：COP通常低于2.5
- ✓ 水源热泵供冷COP低于5.5、IPLV低于7
- ✓ 适合四管制系统、区域能源中心

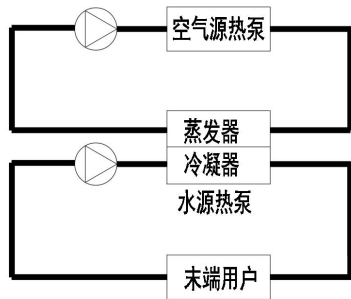


图2 +水源热泵串联供热系统简图

□ + 电蓄热热水锅炉

- ✓ 空气源热泵为主、电蓄热为辅
- ✓ 热水温度推荐范围：40℃~50℃
- ✓ 配电量：考虑原有配电容量的影响
- ✓ 电直接加热，碳排放量大
- ✓ 蓄热槽所需空间大
- ✓ 供热可靠性高的场合，高等级宾馆等

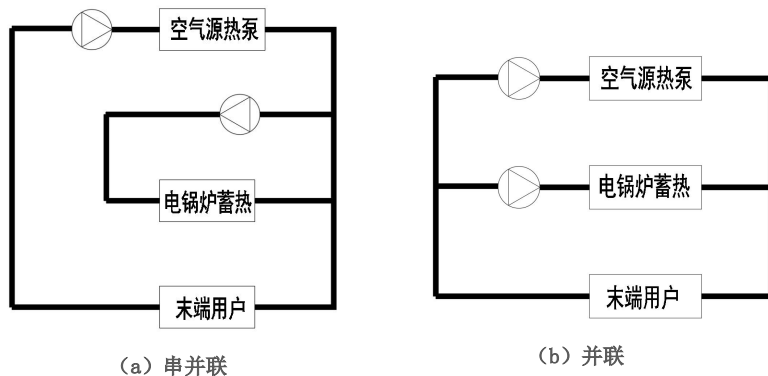
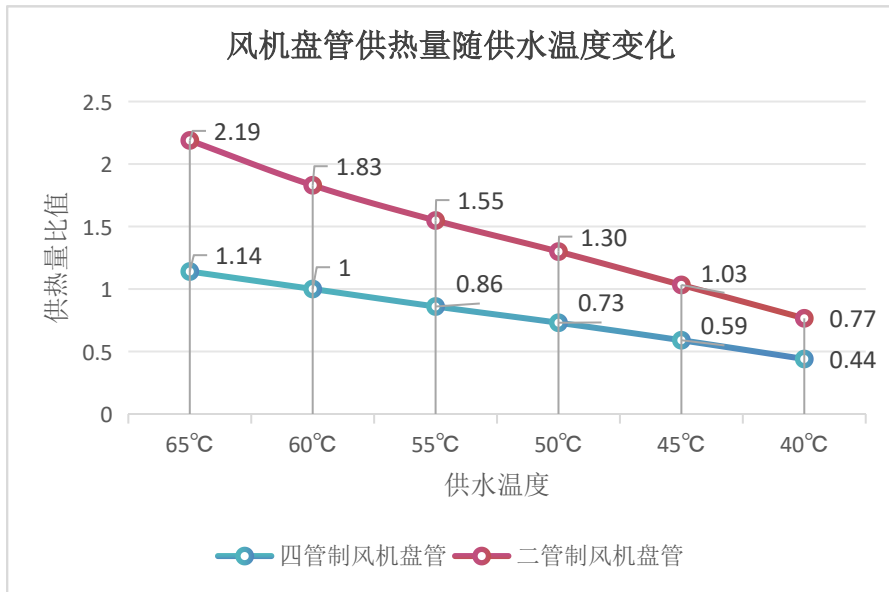


图3 +电锅炉蓄热供热系统简图

空气源热泵+燃气热水锅炉复合供热方案

改造项目技术要点:

- 与原系统供热水温的差异问题：原系统水温65℃~50℃，改造系统水温55℃~40℃
- 应校核空调末端供热能力：影响热源改造方案选择
- 二管制风机盘管：冷热合用盘管
- ✓ 合用盘管供热量变化：25%/5℃
- ✓ 供热量：四管制风机盘管的1.8倍左右
- ✓ 供水温度要求：≥45℃
- ✓ **热源方案：以空气源热泵为主、热水锅炉为辅**
- 四管制风机盘管：分设冷、热盘管
- ✓ 热盘管供热量变化：14%/5℃
- ✓ 供水温度要求：≥60℃
- ✓ 需根据供水温度变化复核供热量
- ✓ **热源方案：以热水锅炉为主、空气源热泵为辅**



空气源热泵+燃气热水锅炉复合供热方案

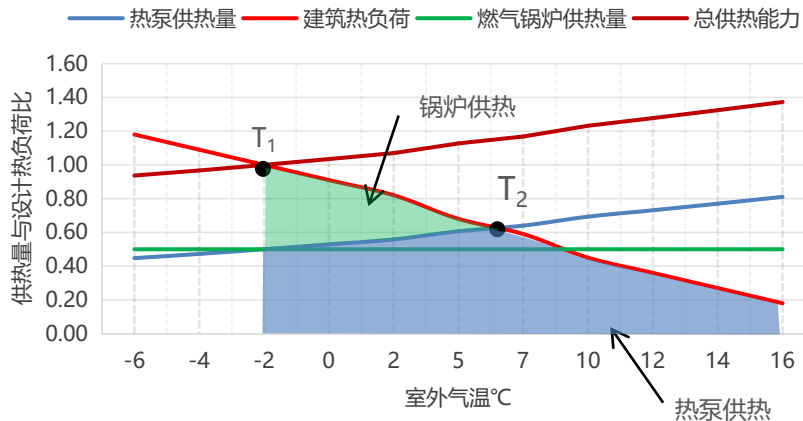
□ 改造项目容量配置原则：

- ✓ 电力扩容的经济性：空气源热泵容量对变配电容量影响
- ✓ 空调末端供暖能力与供水温度的影响
- ✓ 空气源热泵优先运行：热泵容量占比尽量大

□ 改造方案：

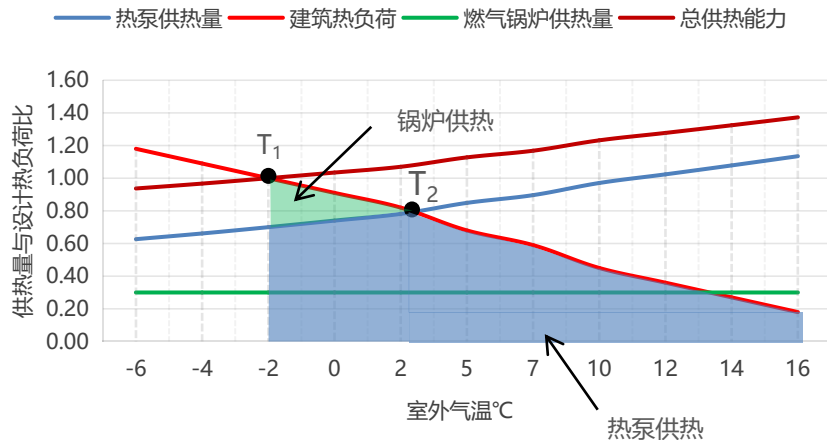
- ✓ 方案1：燃气热水锅炉50%、空气源热泵50%，供水温度50/40℃
- ✓ 方案2：燃气热水锅炉30%、空气源热泵70%，供水温度47/40℃

空气源热泵与燃气热水锅炉供热量



方案1：燃气热水锅炉(50%)、空气源热泵(50%)

空气源热泵与燃气热水锅炉供热量



方案2：空气源热泵(70%)、燃气热水锅炉(30%)

电制冷冷水机组+空气源热泵方案

❑ 冷热源特征

- ✓ 供热工况：空气源热泵
- ✓ 供冷工况：冷水机组+空气源热泵

❑ 机组配置方法

✓ 方法1：以热定热泵机组装机容量，冷水机组承担剩余冷量

- 设备投资少
- 能耗大、碳排量大

✓ 方法2：以热定热泵机组装机容量，以投资回收期定冷水机组装机容量

- 设备投资中
- 能耗小、碳排量小

✓ 方法3：以热定热泵机组装机容量，以冷定冷水机组装机容量

- 设备投资最大
- 能耗最小、碳排量最小

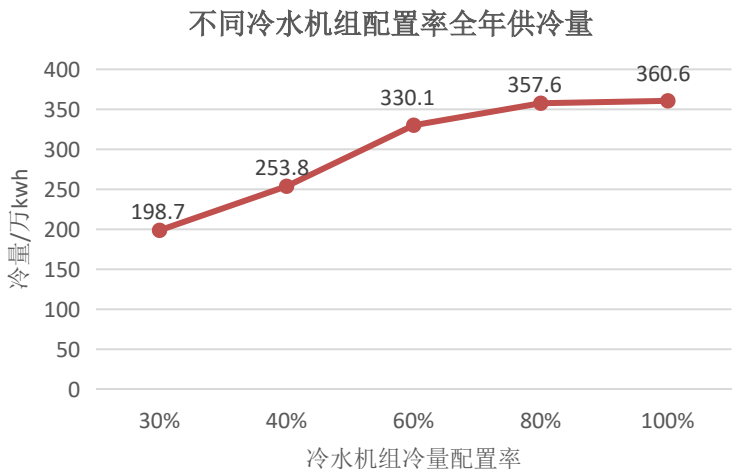
❑ 某办公楼经济性分析（投资、节能与碳排放量、运行费用）

- ✓ 空调面积，45000m²
- ✓ 空调计算冷负荷：4919kw（35℃气温）
- ✓ 空调计算热负荷：2636kw（-2℃气温）
- ✓ 空气源热泵选型：7℃气温供热量3515kw，选用3台1216kw
- ✓ 空气源热泵额定工况供冷：35℃气温供冷量3513kw

表1 部分负荷区间冷量

负荷区间(%)	冷负荷小时数(h)	冷量(kwh)	冷量占比
0~10	70.00	34433	0.010
10~20	140.00	137732	0.038
20~30	110.00	162327	0.045
30~40	210.00	413196	0.115
40~50	270.00	664065	0.184
50~60	250.00	737850	0.205
60~70	220.00	757526	0.210
70~80	120.00	472224	0.131
80~90	40.00	177084	0.049
90~100	10.00	49190	0.014

电制冷冷水机组+空气源热泵方案



□ 分析结论

- ✓ 80%、100%配置率时，全年供冷能耗和碳排放量增速变缓
- ✓ 60%配置率时，静态回收期5.1年，工程上可行
- ✓ 总装机容量系数问题：除了方案1，热泵装机冷量+冷水机组装机冷量之和均大于空调冷负荷，方案5达到1.7倍

《建筑节能与可再生能源利用通用规范》3.2.8条，电制冷冷水机组总装机容量按空调冷负荷值选定，不得另做附加

表2 冷水机组不同配置率经济性分析

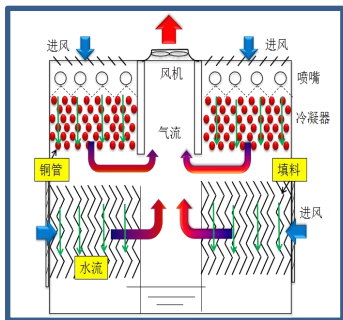
	方法1	方法2			方法3
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
冷水机组负荷率	30%	40%	60%	80%	100%
冷水机组配置	1*1476kw	2*983kw	2*1476kw	3*1310kw	3*1640kw
冷水机组供冷量/万kwh	198.7	253.8	330.1	357.6	360.6
热泵机组供冷量/万kwh	161.8	106.7	30.5	2.95	0
冷水机组能耗/万kwh	39.7	50.8	66.0	71.5	72.1
热泵机组能耗/万kwh	50.6	33.3	9.5	0.9	0
总能耗/万kwh	90.3	84.1/-6.2	75.5/-14.8	72.4/-17.9	72.1/-18.2
CO ₂ 排放量/t	379.3	353.2/-26.1	317.3/-62	304.3/-75	302.8/-76.5
运行费用/万元	90.3	84.1	75.5	72.4	72.1
静态回收期/年	-	4.2	5.1	7.2	9.8

注：冷水机组全年系统COP5.0，空气源热泵全年系统COP3.2，电价1.0元/kwh，碳排放因子0.42

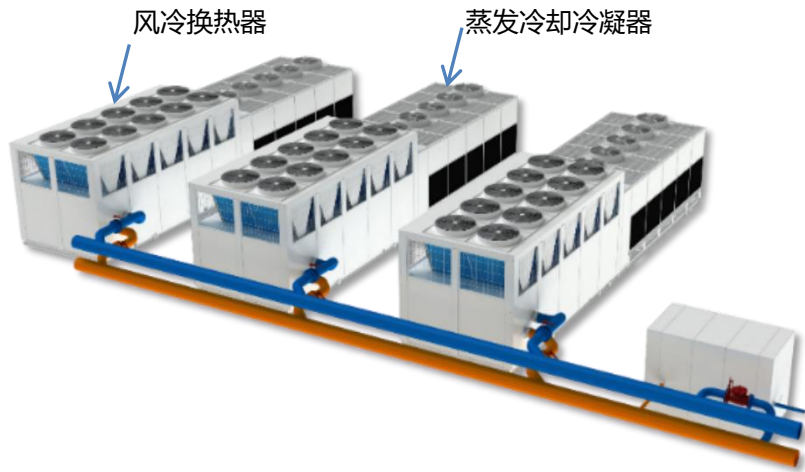
电制冷冷水机组+空气源热泵方案

□ 蒸发冷却的应用——双冷凝器空气源热泵

- ✓ 蒸发冷却冷凝器：供冷工况，冷却塔与冷凝器合为一体
- ✓ 风冷高效翅片换热器：供热工况
- ✓ 制冷COP: ≥ 5.9
- ✓ 制热COP: ≥ 3.6



蒸发冷却冷凝器



双冷凝器空气源热泵系统



改造案例

上海某办公大楼冷热源改造方案

概况

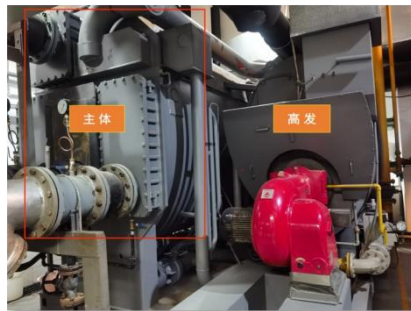
- 建成于1999年年底
- 总建筑面积为36600m²，建筑高度98m
- 两台直燃溴化锂冷热水机组和水泵，已使用24年

存在问题

- 溴化锂机组能力衰减严重，能效1.25→1.0
- 机组供冷水温度12℃
- 室内温度失控，局部30℃
- 加班无空调，部分负荷运行耗能大
- 运行费用高



机房内冷却水泵



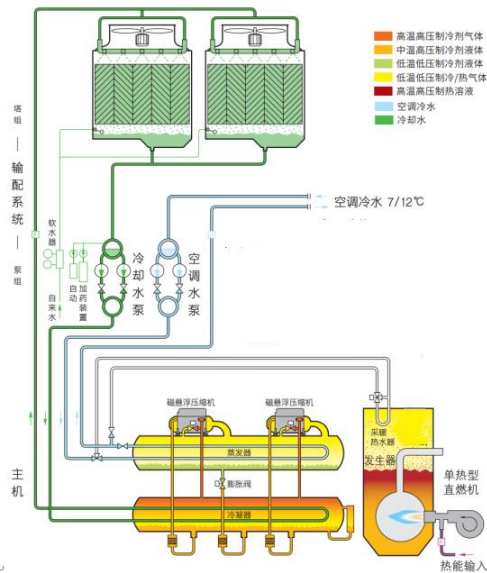
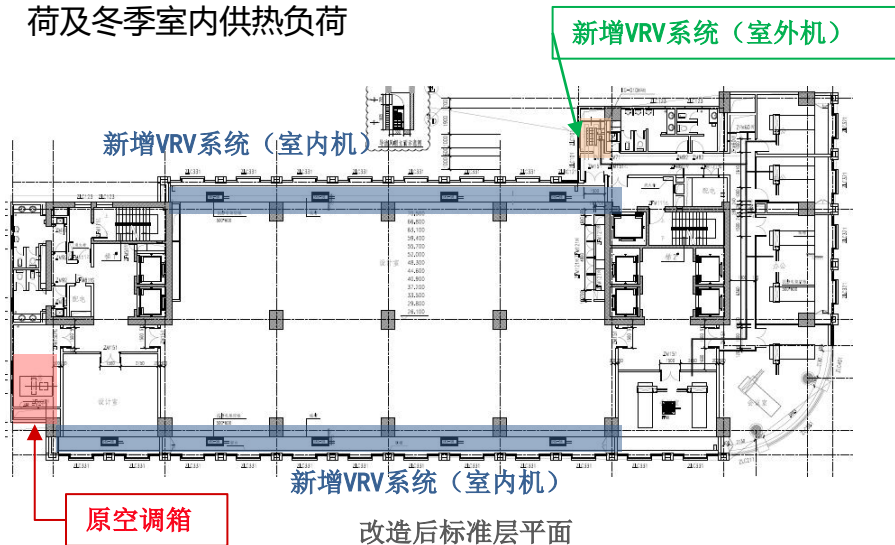
溴化锂机组现状

技术方案

- 高效制冷机房：2台磁悬浮变频冷水机组+水泵变频+高效智能机房控制
- 原直燃机高发供热：冬季新风加热及冬季室内供热负荷
- 楼层外区增加多联机：夏季加班空调负荷及冬季室内供热负荷

运行模式

- 供冷模式：2台磁悬浮变频冷水机组+楼层多联机
- 供热模式：楼层多联机+原直燃机高发
- 加班模式：多联机



磁悬浮制冷机组+直燃机高发原理图

负荷分析

□ 夏季冷负荷: 3913kW

围护结构: 694kW

人员: 747kW

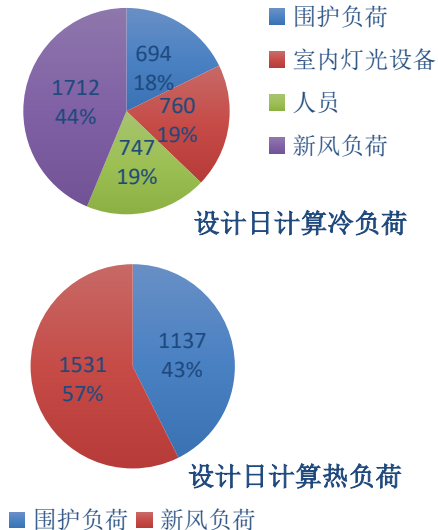
设备照明: 760kW

新风: 1712kW

□ 冬季热负荷: 2668kW

围护结构: 1531kW

新风: 1137kW

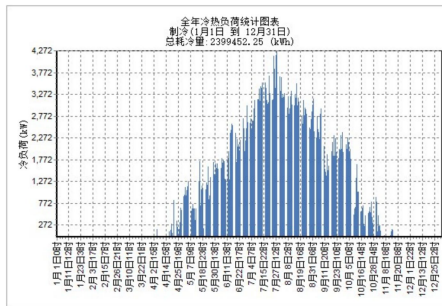


设备配置

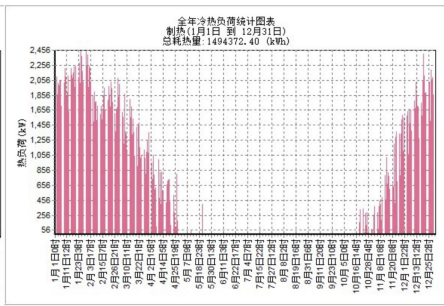
□ 冷水机组: 供冷量3219kW, 2台磁悬浮冷水机组1600kW

□ 多联机: 供冷供热量**694kW**, 各楼层1套22HP

□ 溴化锂高发: 供热量1974kW, 2台1000kw



夏季供冷量



冬季供热量

能耗模拟

□ 高效制冷机房全年COP: 5.50

□ 多联机APF: 5.0

□ 溴化锂机组高发热效率: 85%

□ 全年能耗: 95.3万kWh

□ 单位面积能耗指标: 24.9 kWh/m², 低于2021年上海市办公建筑平均能耗27.9 kWh/m²

□ 如采用空气源热泵代替溴化锂高发, 能耗有望进一步降低

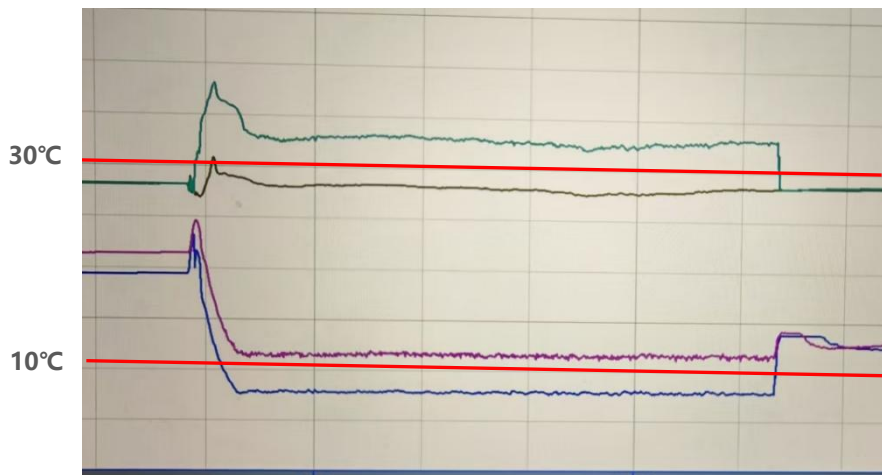
夏季供冷运行流程图

运行控制

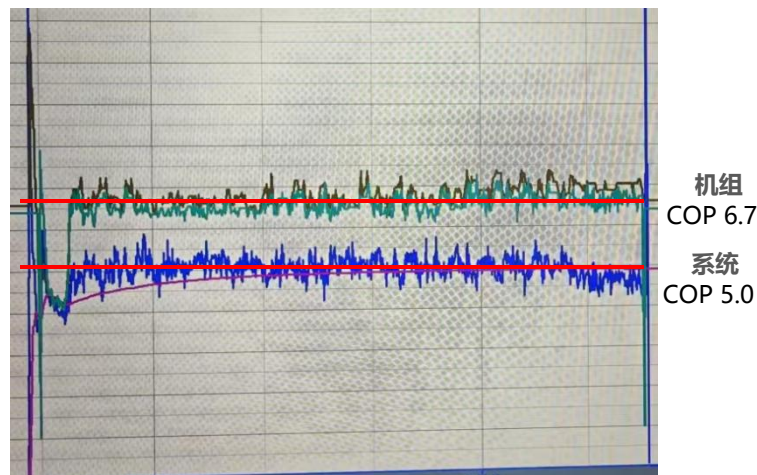
- ✓ 冷水温度设定：按室外湿球温度设定
- ✓ 水泵变频：按温差控制冷水泵、冷却水泵
- ✓ 冷却塔变频：冷却水逼近度控制冷却塔变频

运行情况

- ✓ 8月15日，制冷机房系统COP5.0，机组COP6.7，全年制冷系统COP5.3
- ✓ 冷水供回水温度7°C/11 °C，温差4°C
- ✓ 冷却水供回水温度28°C/33 °C，温差5°C
- ✓ 多联机运行情况：定时供电，夏季供冷——17:00；冬季供热——全天



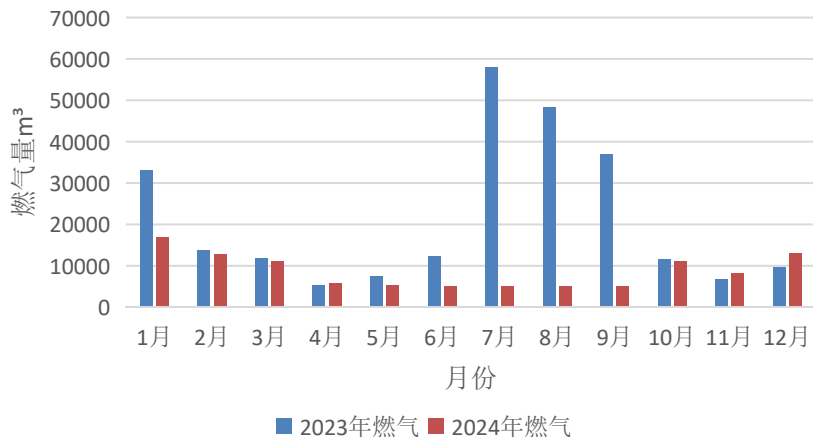
冷水机组冷水温度、冷却水温度日变化图



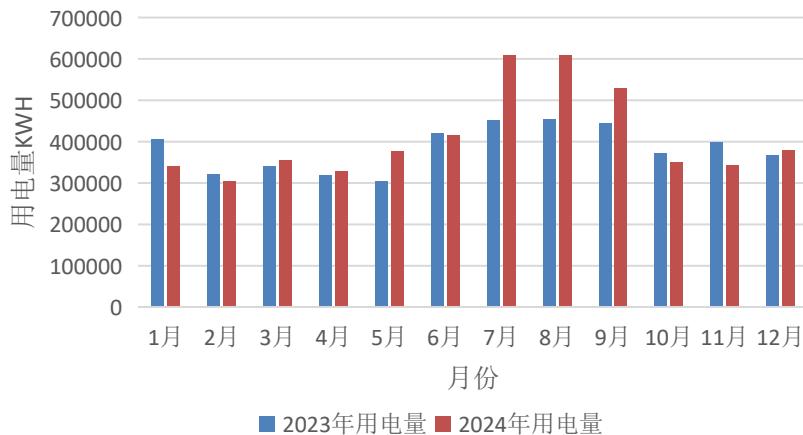
冷水机组COP、系统COP日变化图

运行效果 (1~12月)

- ✓ 大楼总用电量：增加342273kwh
- ✓ 燃气量：减少149921 m³
- ✓ 减碳排放量：用电增加碳排放144t，减少燃气碳排放量324t，全年减碳180t
- ✓ 节约运行费用33万元
- ✓ 解决加班无空调问题



月燃气量 (包含厨房用气)



月用电量



结语

- 空气源热泵型空调是建筑供热降碳的首要方式
- 空气源热泵型空调+燃气热水锅炉在改造项目中具有一定合理性，注意空调末端供热量、供热水温及选择热源配置方案之间的关联性
- 高效制冷系统+空气源热泵的复合式冷热源是夏热冬冷地区建筑实现能碳双控目标的重要方式，但要考虑冷水机组与空气源热泵容量配置的经济性
- 考虑多联式空调在高效复合式冷热源的运用



谢谢!