

暖通与空气品质设计 — 新风系统/空气净化/温湿度控制/气流组织/能耗优化

一、理论基础与方法论

1.1 室内空气质量（IAQ）的科学基础

室内空气质量（Indoor Air Quality, IAQ）研究始于1970年代的"病态建筑综合征"（Sick Building Syndrome, SBS）发现。WHO在2010年发布的《WHO Guidelines for Indoor Air Quality》中系统阐述了室内空气污染对人体健康的影响机制。研究表明，室内空气中的污染物浓度通常是室外的2-5倍，而人一生中约90%的时间在室内度过。

1.2 热舒适度理论

1.2.1 Fanger热舒适方程

丹麦学者P.O. Fanger在1970年提出的PMV-PPD模型是热舒适度评价的国际标准（ISO 7730）：

$$PMV = f(M, W, Clo, Ta, Tr, Va, Pa)$$

其中：M=代谢率(met)，W=机械功，Clo=服装热阻(clo)

Ta=空气温度，Tr=平均辐射温度，Va=空气流速，Pa=水蒸气分压力

PMV等级与PPD关系：

PMV值	热感觉	PPD(不满意率)	设计目标
-3	冷	100%	-
-2	凉	75%	-
-1	微凉	25%	-
0	中性（舒适）	5%	目标区间
+1	微暖	25%	-
+2	暖	75%	-
+3	热	100%	-

设计目标：-0.5≤PMV≤+0.5，PPD≤10%

1.2.2 适应性热舒适模型

de Dear & Brager（1998）提出的适应性模型认为，自然通风建筑中的人对温度波动的容忍度更大：-可接受温度范围 = $0.31 \times \text{室外平均温度} + 17.8 \pm 2^{\circ}\text{C}$ - 这一模型更适合中国夏热冬冷地区的住宅设计

1.3 室内空气质量评价方法

评价方法	指标	标准	适用场景
客观评价	CO ₂ /TVOC/PM2.5等	GB/T 18883-2022	验收检测
主观评价	嗅觉评价(OU)	EN 15251	设计阶段
感知评价	空气质量接受度	ASHRAE 62.1	综合评估
生物标志物	血液/尿液检测	医学标准	健康评估

二、核心知识点详解

2.1 新风系统设计

2.1.1 新风量计算

ASHRAE 62.1-2022 新风量标准：

$V_{bz} = R_p \times P_z + R_A \times A_z$

其中： V_{bz} =区域最小新风量(L/s)

R_p =每人新风量(L/s·人)

P_z =区域最大人数

R_A =单位面积新风量(L/s·m²)

A_z =区域面积(m²)

各空间新风量标准：

空间类型	每人新风量(L/s · 人)	单位面积(L/s · m²)	换气次数
办公室	5-8	0.5-1.0	2-4次/h
会议室	8-10	0.5	3-5次/h
教室	5-8	0.3	2-3次/h
住宅卧室	8-10	-	0.5-1次/h
医院病房	10-15	-	2-3次/h
餐厅	8-10	1.0-1.5	4-6次/h
健身房	10-15	1.5-2.0	4-6次/h

2.1.1.2 新风系统类型

类型	原理	优点	缺点	适用场景	价格
单向流正压	机械送风+自然排风	简单/便宜	排风不可控	住宅/小空间	3000-8000元
单向流负压	自然进风+机械排风	简单	进风不可控	卫生间/厨房	1000-3000元
双向流（带热回收）	机械送排+热回收	节能/舒适	复杂/贵	住宅/办公	8000-30000元
全热交换器	显热+潜热回收	高效节能	需定期维护	各类空间	10000-50000元
新风除湿一体机	新风+除湿+过滤	多功能	价格高	南方住宅	15000-40000元

2.1.1.3 新风系统设计参数

管道设计要点： - 送风口位置：人员活动区上方，远离回风口 - 送风口风速：≤2m/s（住宅）/≤3m/s（办公） - 管道风速：主管≤6m/s，支管≤4m/s - 管道材质：PE/HDPE/PVC（推荐PE，内壁光滑风阻小） - 管道坡度：向室外≥1%（防冷凝水倒灌）

全热交换器参数：

参数	标准值	说明
显热效率	≥70%	温度回收效率
全热效率	≥55%	含湿度回收
过滤效率	H11-H13	HEPA等级
噪音	≤35dB(A)	低档运行
能耗	80-200W	家用机型

2.2 空气净化系统

2.2.1 空气净化技术对比

技术	去除对象	效率	优缺点	适用
HEPA滤网	PM2.5/花粉/细菌	≥99.97%(0.3μm)	物理过滤/无副产物	首选技术
活性炭	甲醛/TVOC/异味	80-95%	需定期更换	气态污染物
光催化(TiO₂)	VOC/细菌/病毒	60-80%	需UV灯/可能产生臭氧	辅助技术
等离子体	细菌/病毒/VOC	70-90%	可能产生臭氧	谨慎使用
负离子	PM/细菌	50-70%	效果有限/无副产物	辅助技术

UV-C杀菌	细菌/病毒	≥99%(足够剂量)	需足够照射时间	风管安装
--------	-------	------------	---------	------

2.2.2 空气净化器选型参数

参数	含义	选择标准
CADR（颗粒物）	洁净空气输出量(m³/h)	房间面积×3
CADR（甲醛）	甲醛去除速率	≥200m³/h
CCM	累计净化量	P4(≥12000mg)/F4(≥1500mg)
噪音	最大/最小运行噪音	睡眠模式≤30dB(A)
能耗	功率	≤50W(高效档)
适用面积	CADR×0.1	按实际需求

2.3 温湿度控制

2.3.1 室内设计参数

季节	温度	湿度	风速	适用标准
夏季制冷	24-28℃	40-60%	≤0.3m/s	GB 50736
冬季采暖	18-22℃	30-60%	≤0.2m/s	GB 50736
过渡季节	自然通风	-	-	适应性模型
恒温恒湿室	20±1℃	50±5%	≤0.1m/s	实验室标准

2.3.2 空调系统类型

系统类型	冷媒	优点	缺点	适用	价格
分体壁挂	R410A/R32	便宜/简单	外机多/不美观	单间	2000-8000元
多联机（VRV）	R410A	一拖多/节能	价格高	住宅/办公	3-8万/套
风管机	R410A	隐藏安装	一拖一	单间/小空间	5000-15000元
水系统中央空调	水	舒适/大空间	复杂/需维护	别墅/商业	8-30万/套
辐射冷暖	水	静音/均匀	响应慢/结露风险	高端住宅	15-40万/套

2.4 气流组织设计

2.4.1 送风方式

方式	气流特征	适用场景	效果评价
上送上回	顶送顶回	办公/商业	标准方案
上送下回	顶送地回	洁净室	效果好/造价高
侧送侧回	侧墙送风	住宅/小空间	简单经济
地板送风	地面送风	数据中心/高端办公	均匀舒适
置换通风	低速地面送风	剧场/大堂	空气品质最好
个性化送风	桌面送风	高级办公	个人可控

2.5 能耗优化

2.5.1 暖通系统节能措施

措施	节能率	投资回收期	适用场景
变频压缩机	20-30%	2-3年	所有空调

全热回收	15-25%	3-5年	新风系统
自然通风	30-60%	0	过渡季节
夜间通风蓄冷	15-25%	0	办公建筑
地源热泵	30-50%	5-8年	有条件场地
冰蓄冷	20-35%（电费）	5-7年	峰谷电价差大
智能控制	10-20%	1-3年	所有建筑

三、材质与工艺

3.1 风管材料

材料	规格	优点	缺点	价格
镀锌钢板	δ0.5-1.2mm	强度高/防火	重/需保温	60-120元/m²
PE风管	Φ75-200mm	轻便/光滑	不防火	15-40元/m
酚醛复合板	δ20-30mm	保温+风管一体	强度一般	40-80元/m²
聚氨酯复合板	δ20-30mm	保温好	价格高	60-100元/m²
纤维织物风管	定制	均匀送风	不适用高压	80-200元/m

3.2 新风品牌对比

品牌	国家	定位	价格区间	特点
松下Panasonic	日本	中高端	5000-30000元	技术成熟/静音好
大金Daikin	日本	高端	10000-50000元	与空调联动
兰舍S&P	法国	高端	15000-60000元	全热交换效率高
造梦者	德国/中国	中高端	8000-25000元	设计感强
远大	中国	中端	5000-20000元	性价比好
小米	中国	中端	1000-8000元	智能家居联动

四、实践案例

案例1：上海中心大厦暖通系统

- 设计团队：Gensler + 同济大学
- 亮点：双层幕墙自然通风+冰蓄冷+地源热泵
- 节能率：较传统系统节能35%

案例2：北京大兴国际机场暖通

- 设计团队：ADPI + 中国建筑设计院
- 亮点：地源热泵+辐射地板+置换通风
- 节能率：较传统系统节能40%

案例3：Apple Park自然通风设计

- 设计团队：Foster + Partners + Arup
- 亮点：自然通风为主+机械辅助，全年60%时间可不开空调
- 节能率：年节能约30%

案例4：深圳万科总部办公暖通

- 设计团队：中建院

- 亮点：辐射冷暖+新风除湿+智能控制
- 节能率：较传统系统节能45%

案例5：杭州某被动式住宅

- 设计团队：被动房研究所认证
- 亮点：全热交换新风+超级保温+气密性
- 能耗：采暖能耗 $\leq 15\text{kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

案例6：上海某三甲医院洁净手术室

- 设计团队：医疗设计院
- 亮点：独立新风+三级过滤+正压控制
- 洁净度：ISO 5级(百级)

案例7：成都某数据中心暖通

- 设计团队：ICT设计院
- 亮点：自然冷却+热回收+液冷技术
- PUE：1.15（行业领先）

案例8：北京某学校教室新风改造

- 设计团队：教育+暖通
- 亮点：CO₂联动新风+HEPA过滤
- 效果：CO₂从2000ppm降至800ppm

五、施工/制作指导

5.1 新风系统安装流程

方案设计 → 管路放线 → 管道安装 → 设备安装 → 风口安装 → 风量调试 → 验收

5.2 关键施工要点

- 管道密封：所有接口用铝箔胶带密封
- 管道支撑：每隔1.5m设支架
- 穿墙处理：穿墙处加套管+密封
- 设备减震：设备安装减震垫
- 冷凝水排放：管道低点设排水口

六、性能指标与评测

6.1 室内空气质量评测

指标	标准限值	检测方法	频率
CO ₂	$\leq 1000\text{ppm}$	红外CO ₂ 分析仪	连续/季度
PM2.5	$\leq 50\mu\text{g}/\text{m}^3$	颗粒物检测仪	连续
甲醛	$\leq 0.08\text{mg}/\text{m}^3$	AHMT法/电化学	年
TVOC	$\leq 0.60\text{mg}/\text{m}^3$	GC-MS	年
温度	18-28°C	温度计	连续
湿度	30-60%	湿度计	连续
噪音	$\leq 45\text{dB(A)}$ (办公)	声级计	年

七、适用场景与人群

场景	推荐方案	预算
住宅（100㎡）	全热交换新风+净化器	1-3万元
办公（500㎡）	新风+空调+智能控制	100-200元/㎡
学校教室	壁挂新风+净化	5000-15000元/间
医院	独立新风+过滤+正压	200-500元/㎡
高端住宅	五恒系统(恒温恒湿恒氧恒洁恒静)	30-80万元

八、市场评价与行业动态

8.1 趋势

- 五恒系统（恒温恒湿恒氧恒洁恒静）成为高端住宅标配
- 新风系统与智能家居深度联动（米家/华为/苹果）
- 被动式建筑标准推动超低能耗新风系统
- 疫情后室内空气品质关注度大幅提升

九、内容指导文件

9.1 选型决策树

住宅面积 → 需求 → 推荐方案

- └─ <80㎡ → 基础通风 → 壁挂新风（3000-8000元）
- └─ 80-150㎡ → 全屋新风 → 全热交换新风（10000-25000元）
- └─ >150㎡ → 舒适系统 → 新风+空调+除湿（30000-80000元）
- └─ 高端需求 → 五恒系统 → 辐射+新风+除湿+净化（15-50万元）

十、购买决策问答

Q: 高预算别墅在300㎡空间，如何选择暖通方案？ A: 推荐方案：①五恒系统（辐射采暖+新风除湿+净化，约30-60万元）②地源热泵主机（约15-25万元）③智能控制（约5-10万元），总预算约60-100万元

Q: 中预算家庭在100㎡住宅，如何选择新风系统？ A: 推荐方案：①松下/大金全热交换新风机（15000-25000元）②PE管道+设计安装（约5000-10000元）③风口+调试（约2000-5000元），总预算约2.5-4万元

Q: 低预算家庭在60㎡出租房，如何改善空气质量？ A: 推荐方案：①小米/造梦者壁挂新风（3000-6000元）②空气净化器（小米/三星，1000-3000元）③CO₂监测仪（200-500元），总预算约5000-10000元

Q: 中预算企业在500㎡办公，如何选择暖通方案？ A: 推荐方案：①多联机空调系统（约100-200元/㎡）②新风系统（约50-100元/㎡）③智能控制+传感器（约20-50元/㎡），总预算约50-100元/㎡

Q: 高预算医院在2000㎡洁净区域，如何选择暖通方案？ A: 推荐方案：①独立新风+三级过滤（约300-500元/㎡）②恒温恒湿精密空调（约200-400元/㎡）③正负压控制系统（约100-200元/㎡），总预算约300-600万元

十一、热点与趋势

11.1 行业热点

- 五恒系统在高端住宅市场快速增长
- 新风系统从可选变为标配
- 碳中和目标推动暖通系统节能升级
- AI+暖通：智能预测+自适应控制

附录：关键标准号/参考文献

标准号	名称
GB 50736-2012	民用建筑供暖通风与空气调节设计规范
GB/T 18883-2022	室内空气质量标准
GB 50118-2010	民用建筑隔声设计规范
ISO 7730	热舒适度标准(PMV-PPD)
ASHRAE 62.1-2022	通风标准
ASHRAE 55-2020	热舒适标准

参考文献

1. Fanger, P.O. *Thermal Comfort*. McGraw-Hill, 1970.
2. WHO. *Guidelines for Indoor Air Quality*. 2010.
3. 杨昌智. 《暖通空调》. 中国建筑工业出版社, 2020.
4. ASHRAE. *ASHRAE Handbook - HVAC Applications*. 2023.