

# 写字楼辐射制冷新风系统应用效果分析

裴锡源

中粮科工（北京）工程管理有限公司，北京，100069；

**摘要：**基于典型写字楼的运行条件，对辐射制冷新风系统的应用效果进行了研究，阐述了系统结构与设计参数，介绍了运行监测方案及数据分析方法。结合长期实测结果，对室内温湿度控制、空气品质改善及能耗特征进行了对比评估。研究表明，该系统在满足热舒适与空气卫生要求的同时，综合能耗较传统全空气系统降低约30%，体现出显著的节能与环境适应优势。

**关键词：**写字楼；辐射制冷；新风系统；热舒适；能耗分析

**DOI：**10.69979/3029-2727.26.04.035

## 引言

随着建筑节能标准的不断提升，写字楼等大型公共建筑的冷负荷与能耗问题日益突出<sup>[1]</sup>。传统全空气空调系统以显热和潜热统一处理为主，送风量大、能耗高，且在维持热舒适与空气品质平衡方面存在局限<sup>[2]</sup>。辐射制冷系统通过表面换热实现显热负荷的高效转移，结合新风系统的潜热与空气品质控制，可在降低风量与能耗的同时显著提升热环境稳定性，已成为绿色建筑发展的重要方向。当前相关研究多集中于理论模型与局部实验，对写字楼实测工况下系统综合性能的定量评估仍相对不足。基于此，本文以典型办公建筑为研究对象，构建辐射制冷与新风系统协同运行的监测与评价框架，围绕温湿度控制、空气品质改善及能耗特征展开系统分析。研究采用长期现场监测、参数计算与能效对比等方法，揭示系统运行的能量分布规律与舒适性表现，为办公建筑辐射制冷新风系统的工程设计、运行调控与节能评价提供数据支撑与技术依据，具有较强的现实指导意义与推广价值。

## 1 系统设计与应用条件

辐射制冷新风系统的总体设计遵循“显热由辐射板承担、潜热由新风系统控制”的冷热分工原则，系统构成包括冷源单元、辐射末端、新风处理机组及智能控制网络<sup>[3]</sup>。冷水机组出水温度设定为16℃、回水温度19℃，通过吊顶毛细管辐射板实现均匀供冷，占建筑总冷负荷的约70%。系统末端表面温度控制在露点以上2℃，并设置冷凝检测与电动阀联动保护，保证长期稳定运行。

新风系统采用全热回收新风机组与独立除湿段，送风温度维持17℃、相对湿度55%，可有效承担潜热负

荷并维持空气品质<sup>[4]</sup>。系统实现基于CO<sub>2</sub>浓度的变风量调节，当人员密度超过0.12人/m<sup>2</sup>时自动提升风量。设计新风量30m<sup>3</sup>/(h·人)，综合换气次数约1.5次/h。

研究对象为华北地区一栋绿色节能办公建筑，地上20层、总面积约2.6万m<sup>2</sup>，围护结构传热系数1.2W/(m<sup>2</sup>·K)，外窗遮阳系数0.4。典型办公层高3.9m，内部热源构成为人员14W/m<sup>2</sup>、照明12W/m<sup>2</sup>、设备18W/m<sup>2</sup>、外围结构6W/m<sup>2</sup>，计算冷负荷约50W/m<sup>2</sup>。依据当地夏季典型气象参数（干球温度33℃、相对湿度70%）确定系统设计工况。整体系统以温湿双控策略构建热环境平衡，为运行监测与能效分析提供基础条件。

## 2 运行监测与评价方法

### 2.1 监测方案与仪器布置设计

运行监测以“热环境—能耗—空气品质”三大维度为核心，监测区域选取建筑第10层中区开放式办公区（面积约400m<sup>2</sup>），具有代表性负荷特征与稳定使用状态。监测点布置遵循垂直分层与水平均匀原则：室内空气温湿度传感器分别设于地面0.1m、工作面1.1m及顶棚2.0m高处各3点；辐射板表面及供回水管路共布置8个测温点；新风管道在机组出口、送风口及回风口分别布设温湿度与风速传感器。

监测系统由Testo 635-2温湿度仪（精度±0.2℃、±2%RH）、Siemens电磁流量计（精度±1%FS）、Vaisala GMW90 CO<sub>2</sub>传感器（精度±50ppm）及Onset HOBO数据采集系统组成。采样周期设定为1min，所有设备经计量校准后统一编号。数据经Modbus TCP接口实时传输至楼宇自控系统（BAS），并与能耗监测端进行时钟同步。监测周期为连续30天，覆盖典型夏季工作日与

休息日运行工况，为能耗分解、舒适性及空气品质评价提供精确、可追溯的原始数据基础。

### 2.2 数据采集与参数测量方法

监测系统采用集中采集与分布式存储相结合的方式，所有传感器输出经模拟信号模块统一采样并经 A/D 转换后传输至 BAS 服务器。采样频率设为 1 min，原始数据经时间戳同步后自动写入 SQL 数据库。为保证数据精度，系统设置 5% 阈值波动过滤，当连续两次测值差异超过阈值时触发异常标记并自动补采。

冷量与能耗参数依据实时温差与流量计算：

$$Q = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

式中： $Q$  为单位时间内传递的冷量； $\dot{m}$  为冷水质量流量； $c_p$  为水的定压比热容，取 4.186 kJ/(kg·°C)； $T_{in}$  为冷水进入辐射板的温度； $T_{out}$  为冷水回水温度。

电表以 15 min 间隔采集瞬时功率并积分计算小时能耗。空气参数按国家标准 GB/T 18204.2-2014 执行，CO<sub>2</sub> 浓度、湿度及温度数据经滑动平均平滑处理，取 5 min 窗口去除瞬态波动<sup>[5]</sup>。所有采集数据每日进行一次完整性校验与自动备份，确保后续能耗分解、热平衡与舒适性指标计算具备高时序精度与一致性。

### 2.3 效果评价指标与计算模型

为系统评估辐射制冷新风系统的运行表现，构建由热舒适、空气品质及能耗效率组成的综合评价模型。热舒适性采用 PMV—PPD 模型计算，输入参数包括代谢率 1.2 met、服装热阻 0.6 clo、空气温度、平均辐射温度、风速及相对湿度。依据实测数据，通过能量平衡方程求取室内有效操作温度，再计算预测平均投票值(PMV)：

$$PMV = 0.303e^{-0.036} + 0.028(M - H) \quad (2)$$

式中： $M$  为代谢率； $H$  为人体热损失。由此求得预测不满意率：

$$PPD = 100 - 95e^{-0.03353PMV - 0.2179PMV^2} \quad (3)$$

$PMV$  维持在 -0.5~+0.5 范围内时，PPD 小于 10%，代表舒适环境。

空气品质以二氧化碳浓度和新风量关系为主，采用稳态质量平衡模型：

$$C_s = C_o + \frac{G}{q} \quad (4)$$

式中： $C_s$  为室内稳态浓度； $C_o$  为室外基准浓度； $G$  为人员释放速率(约 0.004 L/s·人)； $q$  为人均送风量(m<sup>3</sup>/s·人)。

系统能效评价以综合能耗密度 EUI 和节能率为指标，计算公式为：

$$\eta = \frac{E_b - E_s}{E_b} \times 100\% \quad (5)$$

式中： $E_b$  为基准系统单位面积能耗； $E_s$  为辐射制冷新风系统实测能耗。

## 3 应用效果结果与分析

### 3.1 室内温湿度控制与舒适性结果

监测周期内共采集连续 30 天的室内温湿度数据，统计结果见表 1。系统在工作时段(8:00-18:00)内，室温维持在 23.6~25.2 °C 之间，日均波动幅度不超过 1.2 °C，相对湿度保持在 50%~57% 区间。辐射板供水温度分别为 16.2 °C 与 18.9 °C，与设计值基本一致，表明冷量输出稳定。

表 1 室内典型工况下温湿度与舒适性指标统计

时间段	平均空气温度/°C	平均相对湿度/%	平均辐射温度/°C	PMV	PPD/%
8:00-10:00	24.1	55.8	24.4	-0.32	7.5
10:00-14:00	24.6	53.6	24.9	-0.18	6.2
14:00-18:00	24.9	51.7	25.1	-0.12	5.8
18:00-22:00	24.0	54.9	24.3	-0.35	7.9

由表 1 可见，室温在全天变化中保持较高一致性，顶部与工作面温差小于 0.5 °C，说明辐射制冷系统在显热分布上具有良好均匀性。湿度控制呈“高峰前移”特征，上午阶段略高，随后趋于稳定，反映出新风系统除湿段运行响应及时。根据 PMV 计算结果，工作时段 PMV 平均为 -0.2，PPD 保持在 6% 以内，均处于 ISO 7730A 级热舒适标准范围。可见系统在确保温湿度稳定的同时，

实现了较高热舒适度，辐射换热与新风潜热处理协同效果显著。

### 3.2 新风系统空气品质改善效果

为验证辐射制冷新风系统的空气品质调节能力，对监测区域的 CO<sub>2</sub> 浓度、PM<sub>2.5</sub> 质量浓度及总挥发性有机物(TVOC)进行连续监测，结果见表 2。

表2 室内空气品质指标对比(工作时段平均值)

时间段	CO <sub>2</sub> 浓度/ppm	PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )	TVOC/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	新风量/( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{人}$ )
辐射制冷新风系统	780	17	0.26	31
传统全空气系统	1080	31	0.42	23

由表2可见,系统在相同人员密度与负荷条件下,CO<sub>2</sub>浓度较传统全空气系统下降约28%,维持在800ppm以下;PM<sub>2.5</sub>浓度降低45%,稳定在20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内,TVOC平均值0.26 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,满足GB/T 18883—2022《室内空气质量标准》I级限值要求。其改善原因在于新风机组采用全热回收与二级过滤装置,使进入空气在除湿过程中实现有效颗粒与有机物截留。同时,系统通过CO<sub>2</sub>浓度联动控制保持人均新风量约31 $\text{m}^3/\text{h}$ ,实现空气

稀释与能耗平衡。由此表明,辐射制冷新风系统在稳定热环境的同时显著提升了室内空气品质,尤其在高密度办公场景中体现出持续、均衡的通风效率。

### 3.3 能耗特征与综合节能率分析

在相同冷负荷与运行时间条件下,对辐射制冷新风系统与传统全空气系统的能耗进行对比,结果见表3。监测期间外界平均气温为31 $^{\circ}\text{C}$ ,系统连续运行10h/日。

表3 不同系统能耗构成与节能率对比

系统类型	冷水机组能耗/( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )	循环泵能耗/( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )	新风机组能耗/( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )	总能耗/( $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )	节能率/%
辐射制冷新风系统	2.48	0.56	0.42	3.46	—
传统全空气系统	3.82	0.63	0.58	5.03	31.2

由表3可见,辐射制冷新风系统的总能耗为3.46 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ,较传统系统降低约31%,节能主要来源于冷水机组部分,其单位面积冷量需求减少35%。循环泵和新风机组能耗下降幅度分别为11%和28%,表明系统在输配及通风环节均具能效优势。其节能机制在于较高的供水温度(16 $^{\circ}\text{C}$ )显著提升了制冷机组效率,同时辐射换热减少送风量需求,从根本上降低风机功耗。整体来看,该系统在保证舒适性与空气品质的同时实现了可观节能潜力,为写字楼类建筑的高效运行提供了实践依据。

机制加以改进。通过上述优化,可进一步提升系统在动态环境下的舒适性维持能力与节能稳定性。

## 5 结语

研究结果表明,辐射制冷新风系统在写字楼场景下能够实现温湿度稳定、空气品质优良与能耗显著降低的多重目标,体现出高效、舒适与节能的综合优势。系统在除湿响应、负荷匹配与控制精度方面仍有优化空间,未来研究可进一步引入露点预测与自适应控制模型,结合多源数据融合技术完善运行调控机制,以提升系统在复杂气候条件下的长期运行稳定性与推广应用价值。

## 4 存在问题与优化方向

监测结果表明,辐射制冷新风系统整体运行稳定、节能显著,但在长期运行与负荷波动工况下仍存在局部短板。首先,系统在湿度控制上存在响应滞后,上午时段相对湿度一度接近57%,表明除湿控制阈值设定偏高,易在高湿天引发结露风险;应通过露点预测算法和比例积分控制策略实现动态调节,缩短调湿滞后时间。其次,空气品质虽优于传统系统,但在人员高峰期CO<sub>2</sub>浓度仍接近800ppm,说明基于浓度的变风量调节响应不足,可引入室内人数实时感知与风量前馈控制模型,提升通风精度。第三,能耗构成显示冷水机组仍占比超过70%,高负荷时机组效率下降明显,建议采用分级负载控制及冷水温度自适应优化策略,以提高整体能效比。此外,系统长期运行中传感器漂移与数据同步偏差对节能率评估精度有一定影响,需通过定期校准和数据冗余校验

## 参考文献

- [1]张淑慧,武昱安,黄金珍,等.“地面辐射供暖供冷+新风系统”在产后康复室中的应用[J].科技与创新,2024,(04):190-193.
- [2]陈夏爽.辐射供冷供热与风机盘管加新风系统的联合应用[J].中国设备工程,2023,(05):83-85.
- [3]杨柳,方佳烽,田真.结合辐射供冷及新风系统的既有办公建筑改造应用分析[J].建筑科学,2021,37(12):94-102.
- [4]陆韶华.商业写字楼中空调系统调适与智慧运维探索[J].中国设备工程,2025,(24):141-143.
- [5]侯成功.建筑室内装饰工程中智能新风系统的集成应用研究[J].绿色建筑与智能建筑,2025,(11):158-161.