

# 暖通设备节能改造策略及运维效益分析

郭翔

中石化绿源地热能（陕西）开发有限公司 陕西咸阳 712000

**摘要：**建筑运行能耗居高不下，暖通空调系统占据显著比例，其设备老化、效率低下及控制粗放问题突出，在双碳战略背景下实施节能改造迫在眉睫。本研究旨在系统梳理暖通设备节能改造核心策略，建立涵盖经济、节能与环境维度的综合效益分析框架。研究覆盖高效设备更新替换、智能控制系统升级、输配系统水力平衡优化等关键改造路径，提出应用能耗对比分析和关键指标量化方法，重点计算节能率、投资回收期及碳排放削减量。典型工程案例验证表明，集成化改造策略可显著降低系统运行能耗与费用，实现快速经济回报并减少环境负荷。结论指出，设备变频化更新、智能群控优化与精细化运维管理的结合是提升暖通系统能效的核心路径，为同类项目提供有效技术参考与实践指导。

**关键词：**暖通设备；节能改造；运行效益；节能率；投资回收期

## 引言

暖通空调系统是现代建筑能源消耗的核心组成部分，其运行效能直接影响建筑总体能耗水平与运营成本。大量既有建筑服役的暖通设备存在技术迭代滞后问题，表现为设备老化导致运行效率衰减、控制系统智能化程度不足造成能源粗放使用、输配管网水力失调引发无效能耗攀升，这不仅推高建筑运营费用，更衍生显著的能源浪费与环境负荷。在全球能源资源趋紧及应对气候变化共识深化的背景下，中国明确设定碳达峰碳中和的战略目标，建筑领域作为能耗大户面临迫切的节能减排压力。提升现有暖通系统能效成为建筑可持续运营与达成双碳目标的关键切入点。然而，节能改造实践中仍存在技术路径选择碎片化、改造效益评估维度单一、实践验证不足等挑战，亟待系统梳理有效的改造策略并构建科学的量化分析框架。清晰界定暖通设备改造的核心路径及其所能带来的经济节约、能源节约与环保效益，对指导工程实践、优化资源配置和推动建筑行业绿色转型具有显著的现实意义和应用价值。

## 一、暖通设备节能改造关键策略

### （一）高效设备更新应用

冷水机组与热泵系统的能效升级对建筑能耗结构产

生决定性影响，变频驱动技术通过实时调节压缩机转速精准跟随负荷需求变化，解决变频机组在部分负载工况下效率骤降及频繁启停损耗问题，特别适合商业综合体等负荷波动性场景。磁悬浮轴承技术消除传统机械摩擦损耗，配合全变频控制使机组综合节能率突破40%，尤其适配数据中心等高连续性供冷场景。吸收式机组利用工业余热或区域热电联产的低品位热源驱动制冷循环，实现能源梯级利用价值倍增。高效离心机采用三元流叶轮技术优化气动效率，结合强化传热管表面微结构设计提升冷凝换热系数，新国标一级能效机组较旧设备节能率普遍达25%以上。

### （二）智能控制系统升级

暖通系统智能化控制是实现全局能效优化的关键，冷热源群控系统基于支持向量机构建负荷预测模型，融合气象参数与历史运行数据建立动态负荷曲线，结合冷水机组部分负荷性能图谱数据库实现多目标优化求解，采用蚁群算法动态选择最佳主机运行组合与负载配比，有效规避设备频繁启停造成的能耗尖峰。输配系统变流量控制建立管网能耗最小化数学模型，应用自适应模糊PID控制器调节变频水泵转速，通过最不利环路压差传感器实时反馈构建闭环控制系统，采用梯度下降算法动态寻优工作压差设定值，消除过量输配导致的30%额外能耗。

### （三）输配系统优化

管网输配效率的实质提升依赖系统性优化改造，水

**作者简介：**郭翔，1989年11月，性别，男，民族，汉族，单位：中石化绿源地热能（陕西）开发有限公司，职称：工程师，学历：本科。

力平衡调试需基于节点流量平衡方程建立管网动态水力模型,采用便携式超声波流量计实测各支路流量分配偏差,应用平衡阀调节特性曲线进行迭代调整,实现末端装置流量分配误差控制在5%以内。管网保温性能劣化导致能量输送损耗可达总冷量的8%,采用纳米气凝胶复合材料替换传统橡塑保温层,导热系数降至 $0.018\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下,对弯头法兰等复杂节点实施三层错缝包覆工艺,确保绝热层表面温度始终高于环境露点温度 $2^\circ\text{C}$ 以上。流体输送组件升级重点替换高流阻阀门,传统截止阀在额定流量下的局部阻力系数高达5-8,替换为动态压差平衡阀后阻力系数降至1.2以下,采用计算流体力学仿真优化阀体流道结构设计,实现通流截面积增加25%条件下压损降低45%。冷却塔性能提升依托填料与风机的协同改造,高效复合填料将气水接触面积密度提升至 $250\text{m}^2/\text{m}^3$ ,逼近温度差值缩减 $1.5\text{--}2.5^\circ\text{C}$ ,轴流风机改型采用三维扭曲翼型叶片设计,配合永磁同步电机直接驱动技术,在相同散热能力下风机轴功率降低20%。

## 二、节能改造效益分析方法

### (一) 效益分析指标体系建立

暖通节能改造综合效益评估需建立经济节约、能源效率与环境友好三维评价体系,经济效益维度包含短中长期指标,初始投资成本需细化至设备购置、系统集成、管网改造及调试认证等分项支出,融资成本应计入资本加权平均值反映真实资金占用。年度运行成本节省涵盖能源费用降耗与维护支出优化,能源费用节省需依据电价气价峰谷特性分时计量,维护费降低通过设备故障率下降导致的备件更换频次减少及人工巡检工时压缩实现量化。动态投资回收期计算须考虑设备性能衰减与能源价格波动因素,采用净现值模型基化处理时间价值影响更为科学<sup>[1]</sup>。净现值分析关键在于贴现率设定需参照行业基准收益率叠加项目风险溢价系数,确保全生命周期收益折现可比性。内部收益率需设定最低可接受回报率阈值作为决策依据。节能效益指标以绝对节能量为基础,需明确计量边界与折算标准煤当量基准。节能率计算需采用改造前连续十二个月能耗数据作为基准值,排除非改造因素干扰的技术措施包括建立能耗回归模型进行气象归一化校正。

### (二) 量化分析方法

节能量核准采用基准期对比法作为黄金准则,要求改造前基准年与改造后运行年具备完整同期能耗数据集。数据采集需部署0.5级精度智能电表与热计量装置实现冷

热源主机输入功率、水泵风机耗电量及末端能耗分项计量,数据采样周期不大于15分钟以捕获负荷动态特性。数据处理需进行三重校验:应用莱因达准则剔除设备异常运行工况数据点,采用度日数修正模型消除采暖制冷需求差异影响,建立基于运行小时数与负荷率的能耗归一化数学模型排除运行强度干扰。模拟预评估可采用建筑能耗仿真平台构建数字化双胞胎模型,输入气象参数与运行策略模拟不同改造情景节能潜力,但结果仅作为决策参考。经济运行效益量化需构建全要素成本模型。运行成本节省计算需区分能源品种精细化处理,电力成本节省依据分时电价结构分别计算峰平谷时段节电收益,燃气费节省结合阶梯气价与基础容量费分摊机制核算实际降费额度。

## 三、效益评估模型

### (一) 多维度综合效益评估模型

暖通节能改造的实质价值需通过经济、技术、环境协同评价模型系统呈现,该模型整合初始投资成本、运行成本节省、动态投资回收期、节能绝对量与强度指标、碳减排贡献等核心参数构建三维分析矩阵。评估框架采用层次分析法(AHP)结构化处理指标权重,专家赋分系统依据项目类型差异化配置经济性权重系数,商业项目取0.5-0.6,公共建筑取0.3-0.4,环境效益权重随双碳政策深化逐年递增。经济维度评估须纳入能源价格年增长率预测,通常取3%-5%,设备性能衰减曲线修正,净现值计算延伸至设备全生命周期15年观察期。

### (二) 实际项目改造效益分析

某华东地区商业综合体项目建筑面积52000平方米,原暖通系统配置两台定频离心冷水机组(COP 4.8)及四台定流量冷冻泵。主要问题表现在部分负载时机组效率跌至COP 3.2以下,冷冻泵全年运行于额定流量85%以上,实测输配电耗占空调总能耗39%。改造策略包括替换两台磁悬浮变频冷水机组(满负荷COP 6.2),冷冻冷却泵组增设变频驱动器并升级为闭式管网变流量系统,楼宇自控系统嵌入基于机器学习的负荷预测算法及冷水机组效率寻优模块,改造后实施动态水力平衡调试消除近远区流量分配偏差。

能耗数据采集覆盖改造前后完整制冷季(5-10月),采用0.2级精度电能质量分析仪记录分项能耗。改造前空调系统年耗电量1,385,600 kWh,改造后降至1,056,800 kWh。关键设备节能贡献量化显示磁悬浮主机节能率38.2%,变频水泵系统节电率44.3%,控制系统优化间

**表1 某商业综合体暖通改造项目效益指标对比表**

评估指标	改造前基准值	改造后运行值	变化幅度	计算依据
空调系统年耗电量	1, 385, 600 kWh	1, 056, 800 kWh	-23.70%	计量表具连续记录
冷水机组 COP (年均)	4.1	5.8	41.50%	冷量/输入功率比值
冷冻泵组单位冷量电耗	0.082 kWh/RT	0.046 kWh/RT	-44.30%	制冷吨时 ÷ 冷冻泵总耗电量
空调系统年运行费用	1, 177, 760 元	898, 280 元	-23.70%	电价 0.85 元/kWh
设备维护费用	86, 500 元/年	43, 200 元/年	-50.10%	备件更换+人工服务统计
简单投资回收期 (PP)	-	2.8 年	-	(总投资-补贴)/年总节省费用
二氧化碳年减排量	-	191 tCO <sub>2</sub> e	-	节电量 × 华东电网排放因子
电力需求峰值负荷	1, 258 kW	912 kW	-27.50%	当月最高需量记录

注:

总投资额 = 设备更换 760, 000 元 + 自控升级 350, 000 元 + 工程调试 98, 000 元 = 1, 208, 000 元

年总节省费用 = 运行费用节省 279, 300 元 + 维护费用节省 43, 300 元 = 322, 600 元

减排量计算:  $(1, 385, 600 - 1, 056, 800) \times 0.581 \div 1000 = 191 \text{ tCO}_2\text{e}$

接贡献 7.5% 节能效果<sup>[3]</sup>。经济效益核算中电力单价按峰谷平均 0.85 元/kWh 计, 年运行费用节省 279, 300 元, 考虑政府节能补贴 180, 000 元后实际投资回收期缩短至 2.8 年。环境效益依据华东电网排放因子 0.581 kgCO<sub>2</sub>/kWh 计算, 年碳减排量达 191 吨<sup>[4]</sup>。该案例验证了高效设备更新结合智能控制优化的集成改造路径可实现两年内回收投资的商业价值, 某商业综合体暖通改造项目效益指标对比结果如表 1 所示。

### 结语

暖通设备节能改造的核心价值体现于系统性能跃迁与多维度效益共创, 本研究通过高效设备精准适配、智能控制系统深度优化与输配管网协同升级三大技术路径的耦合应用, 构建了覆盖节能潜力挖掘、经济效益核算及环境价值评估的完整方法论体系。实际案例验证了磁悬浮变频机组消除机械损耗的技术优势、变流量控制对无效输配能耗的削减效果, 以及水力平衡调试对系统能效的倍增作用, 这些技术组合使商业综合体项目实现年均 23.7% 的直接节能效益并创造 191 吨碳减排贡献。更

关键的是提供可复制的改造范式, 设备选型须立足负荷动态特性分析, 控制算法设计需融合机器学习和动态寻优技术, 调试过程必须依赖专业水力平衡保障, 整套技术路径以两年内实现投资回收的财务表现证明节能改造的经济可行性。该研究为既有建筑存量市场提供量化决策工具与技术实施指南, 推动暖通行业由粗放运维向精细化能源管理转型, 直接支撑建筑领域双碳目标的达成, 并为节能服务公司设计高回报率改造方案提供实证参考。

### 参考文献

- [1] 李华峰. 建筑工程暖通设备节能措施研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023, (18): 109-111.
- [2] 魏庆芄, 张辉, 许哲文, 等. 某机场暖通空调系统的改造及调试运行[J]. 建筑技术, 2020, 51(06): 666-670.
- [3] 师志杰, 师超. 浅谈建筑暖通节能技术在办公大楼建筑中的应用[J]. 江西建材, 2013, (05): 112-113.
- [4] 中国勘察设计协会建筑环境与设备专业委员会第 2 届技术交流大会[J]. 暖通空调, 2007, (12): 1.