

## 超低能耗建筑中暖通空调系统匹配性设计与能效分析

王旭斌

石家庄市建筑设计院有限责任公司，河北 石家庄 050000

**[摘要]**经济日益发展背景下，全球能源消耗也随之持续增长，社会能源供应压力日渐增大。本研究首先阐述了超低能耗建筑热工特性与系统匹配性设计原则。在此基础上，针对负荷预测、设备选型、系统架构及控制策略环节进行了设计优化，最后提出基于全生命周期的系统匹配性优化策略。研究表明，精准的负荷预测与动态匹配控制不仅能够降低能耗，另外，通过高效利用可再生能源，能够进一步降低碳排放，提升暖通空调技术应用的节能效果，为超低能耗建筑暖通空调系统的科学设计提供了参考。

**[关键词]**超低能耗建筑；暖通空调系统；匹配性设计；能效分析；负荷预测

DOI: 10.33142/ucp.v2i6.18544

中图分类号：TU83

文献标识码：A

## Matching Design and Energy Efficiency Analysis of HVAC Systems in Ultra-low Energy Buildings

WANG Xubin

Shijiazhuang Architectural Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** With the increasing development of the economy, global energy consumption has also continued to grow, and the pressure on social energy supply is increasing day by day. This study first elaborates on the thermal characteristics and system compatibility design principles of ultra-low energy buildings. On this basis, design optimization was carried out for load forecasting, equipment selection, system architecture, and control strategy. Finally, a system matching optimization strategy based on the entire lifecycle was proposed. Research has shown that accurate load forecasting and dynamic matching control can not only reduce energy consumption, but also further reduce carbon emissions and improve the energy-saving effect of HVAC technology applications by efficiently utilizing renewable energy, providing reference for the scientific design of ultra-low energy building HVAC systems.

**Keywords:** ultra low energy consumption buildings; HVAC system; matching design; energy efficiency analysis; load forecasting

### 引言

在全球能源危机与“双碳”目标背景下，节能减排是我国社会生产的重要政策<sup>[1]</sup>，超低能耗建筑成为建筑行业绿色转型的核心方向，致力于降低建筑的总体能耗<sup>[2]</sup>。与传统建筑比，超低能耗建筑借优化围护结构、提升门窗气密性等，大幅降低冷热负荷，采暖能耗通常<15kWh/(m<sup>2</sup>·a)，制冷能耗<25kWh/(m<sup>2</sup>·a)。在超低能耗建筑体系中暖通空调系统作为核心能耗单元，是建筑能源总消耗量中比重最大的模块。因此，系统的匹配性设计的研究与应用，有利于建筑暖通空调总体节能，降低建筑能耗，改善室内的舒适性<sup>[3]</sup>。当前超低能耗建筑的暖通空调系统设计领域中，仍然存在着一系列亟待解决的匹配性难题，包括负荷预测偏差较大、系统架构与建筑热工特性不匹配、控制策略僵化，严重束缚了超低能耗建筑节能潜力的充分释放与发挥。因此，对暖通空调系统的匹配性设计研究工作对于降低能耗、减少碳排放、实现超低能耗建筑发展具有重要意义<sup>[4]</sup>。本文立足超低能耗建筑热工特性，系统分析暖通空调系统匹配性设计的关键技术环节，构建多维度能效评价体系，提出优化策略，旨在为超低能耗建筑暖通空调系统的高效设计与运行提供技术参考。

### 1 超低能耗建筑热工特性与系统匹配性设计原则

#### 1.1 超低能耗建筑核心热工特性

超低能耗建筑热工特性是暖通空调匹配设计基础，核

心为“低负荷、大波动、强耦合”：（1）冷热负荷显著降低：用高效保温材料等使传热系数大降，采暖负荷降60%~70%，制冷负荷降50%~60%；（2）负荷波动幅度大：受多种因素影响，逐时负荷波动大，过渡季峰值与谷值差异达3~5倍；（3）负荷耦合性强：新风、围护结构传热及室内内扰负荷相互耦合，新风负荷占比升至30%~40%，影响系统设计。表1对比了超低能耗建筑与传统建筑的核心热工参数，明确两者的差异特征。

表1 超低能耗建筑与传统建筑核心热工参数对比

参数类型	超低能耗建筑	传统建筑	差异比例
外墙传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	≤0.15	0.4~0.6	降低62.5%~75%
门窗传热系数[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	≤0.8	2.4~3.0	降低66.7%~73.3%
气密性(10Pa下换气次数)[h <sup>-1</sup> ]	≤0.6	1.5~2.5	降低60%~76%
采暖负荷[kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	≤15	40~60	降低62.5%~75%
制冷负荷[kWh/(m <sup>2</sup> ·a)]	≤25	50~70	降低50%~64.3%

#### 1.2 暖通空调系统匹配性设计核心原则

结合超低能耗建筑热工特性，暖通空调匹配性设计核心原则：（1）负荷适配：精准预测逐时冷热负荷，让设备

容量与负荷峰值、均值动态适配。(2) 系统协同：空调、新风、排风及可再生能源系统协同运行。(3) 动态响应：运用动态控制策略实时监测环境参数与负荷变化，对系统的运行参数进行及时、针对性的调整。(4) 全生命周期：综合考量系统全生命周期能耗与经济性。

## 2 超低能耗建筑暖通空调系统匹配性设计关键环节

### 2.1 精准负荷预测：匹配性设计的前提

负荷预测精准度关乎影响匹配设计的科学性，超低能耗建筑负荷受多因素影响更突出，应该用动态预测法结合热工模型与实时数据精准预测负荷。

#### 2.1.1 模型构建

依据建筑热平衡原理，建立含围护结构传热等多种得热的动态预测模型。输入参数有室外气象、建筑热工、室内内扰参数，数学表达式如下：

$$Q(t) = Q_{trans}(t) + Q_{solar}(t) + Q_{int}(t) + Q_{vent}(t)$$

#### 2.1.2 预测方法优化

采用“机理模型+数据驱动修正”混合预测法，用EnergyPlus等软件构建机理模型的初始预测值，再结合建筑实际运行的历史负荷与气象监测数据，用BP神经网络修正预测结果。实践显示，此法可有效降低预测误差，较单一机理模型预测精度提升。

### 2.2 设备选型：负荷与设备性能的精准匹配

基于精准负荷预测，开展空调主机、新风处理设备、水泵、风机等核心设备选型，确保与负荷特性精准匹配。

#### 2.2.1 空调主机选型

超低能耗建筑冷热负荷低且波动大，优先选变频多联机等高效变频设备。根据逐时负荷曲线确定负荷率，确保大部分时间高效运行，地源热泵选型要结合土壤参数避免热失衡。

#### 2.2.2 新风设备选型

新风负荷占比高，选带全热回收功能机组（效率 $\geq 75\%$ ）。依人员密度确定新风量，匹配换热效率，确保处理后温湿度达标。

#### 2.2.3 水泵与风机选型

用变频设备，依水量、风量需求调转速。计算系统阻力损失，匹配扬程/全压与流量，避免低效运行。

### 2.3 系统架构设计：多系统协同匹配

在超低能耗建筑暖通空调系统架构的设计过程中，为了能够达成高效的节能运行目标，需要实现排风系统、空调系统以及可再生能源等各系统之间的协同与精准匹配<sup>[5]</sup>。通过排风系统与新风处理机组的联合应用，在系统中配置高性能的全热交换器通过全热交换器回收排风的冷/热量，实现对新风的有效预热或预冷处理，可以有效控制新风处理的能耗<sup>[6]</sup>；辐射供暖系统因其具备能耗低、舒适性表现良好等优势通常与变频空调系统协同运行，在冬季，

辐射供暖系统主要承担起绝大部分的采暖负荷，变频空调系统作为辅助调节可以避免辐射供暖系统单独运行时的温度滞后问题；通过深度整合传统空调系统与地源热泵、太阳能集热器等先进可再生能源技术组件构建高效协同的复合能源体系，可以高效实现能源的梯级利用。如，太阳能热水优先供新风预热和生活热水，余热用于辐射供暖；地源热泵夏冬分担制冷供暖，过渡季利用土壤特性提高系统的能效<sup>[7]</sup>。

### 2.4 控制策略设计：动态负荷匹配

针对超低能耗建筑负荷波动大，采用“分布式监测+集中控制”策略，使系统参数与负荷变化实时适配。在室内各区、室外气象站及系统关键节点（新风入口等）设传感器，采集温湿度等数据传至中央控制器<sup>[8-9]</sup>。中央控制器依实时数据与负荷预测调整设备参数，按室内温湿度调节压缩机转速等，湿度高时优先除湿，依据CO<sub>2</sub>浓度与人员密度调风机转速，按照供回水温差与室温调水泵转速。实时监测水温参数以及制冷（热）系数（COP）指标，基于监测数据，采用动态优化算法精准分配供能比例，确保系统始终维持高效运行状态。

## 3 超低能耗建筑暖通空调系统能效分析体系

### 3.1 能效评价指标构建

结合超低能耗建筑暖通空调运行特性，构建含热力学效率、能源利用效率、经济性的多维能效评价指标体系，具体指标如下：

表2为能效评价指标的定义、计算方法及评价标准，为能效分析提供量化依据。

表2 超低能耗建筑暖通空调系统能效评价指标体系

评价维度	指标名称	定义	计算方法	评价标准（优秀）
热力学效率	空调机组 COP	机组供能与输入功率的比值	COP=Q/W (Q为制热量/制冷量，W为输入功率)	制冷 COP $\geq 4.5$ ，采暖 COP $\geq 4.0$
	热泵系统 COP	热泵系统总供能与输入功率的比值	COP=Q/W (Q为总供能，W为热泵输入功率)	地源热泵 COP $\geq 3.5$ ，空气源热泵 COP $\geq 2.8$
	全热回收效率 $\eta$	回收冷/热量与理论可回收冷/热量的比值	$\eta=Q/Q \times 100\%$	$\eta \geq 75\%$
能源利用效率	一次能源利用效率 PER	系统总供能与消耗一次能源的比值	PER=Q/E (E为一次能源消耗量)	PER $\geq 3.0$
	能源节约率 $\Delta E$	匹配系统较传统系统的能耗节约比例	$\Delta E=(E-E)/E \times 100\%$	$\Delta E \geq 15\%$
经济性	全生命周期成本 LCC	系统全生命周期内的总费用	LCC=C+C-C	较传统系统降低 $\geq 10\%$
	投资回收期 P	初始投资增量回收所需时间	$P=\Delta C/\Delta C$ ( $\Delta C$ 为投资增量， $\Delta C$ 为年节约费用)	$P \leq 8$ 年

## 4 超低能耗建筑暖通空调系统匹配性优化策略

### 4.1 基于全生命周期的设计优化

突破传统设计理念中“重初始投资、轻运行能耗”的固有局限，采用全生命周期设计方法全面统筹考量系统的设计、运行以及直至报废处置各阶段的能耗表现与成本投入整个流程，在系统的设计环节，组织专业团队进行多方案的比选，从众多方案中筛选出寿命长、能效高、维修成本低的设备与系统。在施工建设环节，应该构建完善的质量管理体系，严格管控施工质量，确保施工人员可以严格按照相关规范与标准执行，以免出现系统管路泄漏等问题而增加能耗。在运行环节，完善设备系统的维护管理制度，通过定期检修变频设备、清洗空调滤网等措施确保系统的高效运行，延长使用周期。在报废阶段，对设备进行回收利用，降低环境影响。

### 4.2 负荷预测与设备选型的动态优化

采用“实时数据动态修正与机器学习深度优化”相结合的负荷预测精细化方法，以建筑实际运行过程中积累的历史负荷数据为依据，采用先进的机器学习算法对预测模型进行训练，从而提高负荷预测的精确度<sup>[10]</sup>。结合逐时负荷曲线的特征采用组合选型模式有效规避单一设备选型过大的弊端，主设备承担平均负荷，辅助设备承担峰值负荷，既可实现设备资源的合理配置，又可以提升设备运行效率。

### 4.3 控制策略的智能化升级

借助人工智能、大数据等前沿技术推动控制策略的智能化、精准化升级<sup>[11]</sup>。依靠建筑信息模型以及实时监测数据，创建起具有预测能力的负荷响应平台，收集和整理各项数据，通过AI算法对系统运行参数进行动态、精准的优化调整。运用无线传感网络技术实现监测点的灵活、高效布置，以确保各类数据能够稳定、安全的传输至管理平台。另外，为了能够随时随地的远程监控系统的运行状况，开发具有功能完备的移动端监控APP，一旦系统发生故障或异常情况，能够第一时间响应，并及时处理故障，进而提高运维效率与质量。

### 4.4 可再生能源的深度集成

多能互补融合趋势，将太阳能、地热能、风能等不同种类的可再生能源同暖通空调系统结合起来，依照各种能源的特点以及建筑的需求，实现能源的合理调配和高效利用<sup>[12]</sup>。充分对建筑所在地的资源条件进行考量，对于太阳能资源较为丰富的区域，创新性的采用“太阳能集热器+光伏板”复合系统，太阳能集热器凭借其高效的集热性能提供生活热水与新风预热，光伏板将丰富的太阳能转化为电能为暖通空调系统供电，实现能源的高效转化率利用，从而降低一次能源消耗。若建筑所处地区地下水丰富采用地源热泵与地下水换热系统，通过热泵机组实现热量从低温热源向高温热源的转移提升热泵COP，降低运行

成本，提升能源的利用效率，达成节能减排的目的。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

暖通空调系统是超低能耗建筑的主要构成部分之一，在暖通空调系统中应用节能减排技术对低碳建筑发展有着非常重要的作用。本文研究对超低能耗建筑暖通空调系统的匹配性设计进行了深入的分析与探讨，得出以下主要结论：鉴于超低能耗建筑的低负荷、大波动、强耦合特性在匹配设计时应该遵循负荷精准适配原则，以建筑实际负荷需求为依据，合理进行配置，考虑到各系统之间的协作与配合，同时从系统的设计、运行到后期的维护各个阶段进行全面的优化。通过精准的负荷预测，根据具体情况合理选择设备，协同系统架构与动态控制策略可以实现对系统运行参数的实时调整与优化，进而降低能源消耗。从系统的整体生命周期出发，开展负荷预测与设备选型的动态优化，以建筑负荷的实时变化情况为依据，对负荷预测模型与设备的选型方案进行及时调整与优化，从而提高系统运行过程中的稳定性。依据先进的智能技术可以实现策略的自适应调整，利用地热能、太阳能等可再生能源，有利于降低建筑行业能源总体消耗量，提升能源的利用率，这对于缓解能源供应问题发挥了重要作用，同时为超低能耗建筑的可持续发展提供有力支撑。

### 6.2 展望

未来研究可从以下方向深入：

(1) 以建筑类型、不同气候期为依据合理开发超低能耗建筑负荷预测模型，提升模型的适用广度与预测精确度；

(2) 积极开展光伏发电系统、建筑围护结构与暖通空调系统之间的协同优化研究工作，实现建筑整体能源系统的运行效能、资源利用等方面提升；

(3) 深度融合数字孪生技术构建暖通空调系统数字孪生模型，凭借实时数据交互能力以及高保真映射精准实现系统运行状态的实时动态仿真，并运用先进的算法模型实现故障的预判，进而推进建筑能源的高效管理与稳定运行。

## 【参考文献】

- [1] 范涛,李翰劼.建筑暖通工程节能施工技术研究[J].建筑机械化,2024,45(11):89-93.
- [2] 王蕾.节能减排理念在建筑暖通空调设计中的应用分析[J].城市建设理论研究(电子版),2024(24):79-81.
- [3] 徐广源,李岩,田善鹏.试析暖通空调中的节能技术以及自动化系统优化设计[J].房地产世界,2024(2):131-133.
- [4] 李晋超.采暖通风空调工程中的节能技术分析[J].电子技术,2022,51(5):200-201.
- [5] 王鹤霖.浅析城市暖通空调节能减排对应策略[J].房地产世界,2021(24):144-146.

- [6] 魏斯胜.绿色建筑暖通空调的节能设计及降噪探究[J].设备管理与维修,2021(24):121-123.
- [7] 肖帆.建筑暖通空调工程节能减排探究[J].建材与装饰,2019(23):241-242.
- [8] 马辉.绿色超高层建筑暖通空调系统节能优化设计研究[J].中国建筑金属结构,2024,23(6):150-152.
- [9] 何鸿展.建筑工程暖通空调设计与施工的质量控制措施[J].四川建材,2024,50(9):190-191.
- [10] 张仲青.机电安装工程中暖通空调安装施工工艺的精细化研究[J].中国高新科技,2024(17):155-157.
- [11] 吴勇,倪良永.BIM 技术在建筑设计评估中的应用[J].建筑机械化,2024,45(12):158-160.
- [12] 范涛,李翰勋.建筑暖通工程节能施工技术研究[J].建筑机械化,2024,45(11):89-93.
- 作者简介：王旭斌（1991.3—），毕业院校：沈阳工业大学，所学专业：建筑与土木工程专业，当前就职单位：石家庄市建筑设计院有限责任公司，职务：职员，职称级别：中级工程师。