

Design and operation efficiency evaluation of HVAC system for ultra-low energy consumption building

Guoliang Lai

Guangzhou Commercial Management Branch of Poly Property Service Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong, 511495, China

Abstract

As the global energy crisis intensifies and environmental issues become increasingly severe, the construction industry, as one of the primary sectors consuming energy, faces significant pressure to conserve energy. Ultra-low energy buildings, as an important direction in building energy conservation, have their HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) system design and operational efficiency become crucial for enhancing overall building energy performance. This paper first analyzes the design principles of HVAC systems in ultra-low energy buildings, explores key technologies such as air conditioning system selection based on building energy requirements, energy recovery technology, and intelligent control strategies, and studies methods for evaluating system operational efficiency. Through case analysis and combining actual operational data from buildings, this paper evaluates the operational efficiency of HVAC systems in ultra-low energy buildings and proposes strategies for optimized design and improved system operational efficiency. The research findings indicate that a combination of rational design and efficient operation can effectively reduce building energy consumption and enhance the environmental adaptability and comfort of buildings.

Keywords

ultra-low energy consumption building, HVAC system, design optimization, energy efficiency assessment, energy saving technology

超低能耗建筑暖通空调系统设计与运行能效评估

赖国良

保利物业服务股份有限公司广州商业管理分公司, 中国 · 广东 广州 511495

摘要

随着全球能源危机的加剧和环境问题的日益严重, 建筑行业作为能源消耗的主要领域之一, 面临着巨大的节能压力。超低能耗建筑作为建筑节能发展的重要方向, 其暖通空调系统 (HVAC) 的设计和运行能效已成为提升建筑整体能效的重要环节。本文首先对超低能耗建筑暖通空调系统的设计原则进行分析, 探讨了基于建筑节能要求的空调系统选择、能源回收技术、智能控制策略等关键技术, 并对系统运行中的能效评估方法进行了研究。通过案例分析, 结合建筑实际运行数据, 对超低能耗建筑暖通空调系统的运行能效进行评估, 提出了优化设计和提升系统运行能效的策略。研究表明, 合理设计与高效运行相结合, 能够有效降低建筑能耗, 提升建筑的环境适应性和舒适性。

关键词

超低能耗建筑、暖通空调系统、设计优化、能效评估、节能技术

1 引言

全球建筑行业的能源消耗问题已成为能源消耗总量中重要的一部分。根据国际能源署 (IEA) 统计, 建筑领域的能耗约占全球总能耗的三分之一。与此同时, 随着全球变暖和环境问题的加剧, 能源消耗的环境影响也日益受到关注。在这种背景下, 超低能耗建筑应运而生, 成为实现绿色建筑和可持续发展的重要途径之一。超低能耗建筑通过采用高效的建筑设计、优质的建筑材料以及智能化的能源管理系统, 旨在最大限度地减少建筑能耗, 提升建筑的能源使用效率。

【作者简介】赖国良 (1980-), 男, 中国广东韶关人, 本科, 工程师, 从事热能与动力工程 (制冷与空调技术) 研究。

2 超低能耗建筑暖通空调系统的设计原则

在推动绿色建筑与可持续发展的背景下, 超低能耗建筑成为未来建筑设计的重要方向。暖通空调系统作为建筑运行能耗的主要组成部分, 其设计是否合理、高效, 直接影响建筑整体的能源表现。在超低能耗建筑中, 暖通空调系统不仅需要满足居住或使用者的舒适性需求, 还必须在保证使用效果的前提下, 实现尽可能低的能源消耗 [1]。因此, 如何在系统设计中贯彻低能耗理念、采用先进的能源回收技术与智能控制手段, 成为暖通空调系统节能设计的关键。

2.1 低能耗设计理念

低能耗设计理念贯穿于超低能耗建筑暖通空调系统设计的全过程。首先, 建筑外围护结构的节能性能是系统节能

的基础保障。通过采用高性能保温材料、高气密性的门窗结构以及合理的立面设计，可以显著降低热量的传递，减少冬季的热损失与夏季的热增益，减轻空调系统的负荷。例如，被动式建筑中广泛应用三层中空玻璃窗、外墙复合保温系统及热桥断绝设计，大大减少了能量交换，提高了热舒适性。

其次，在建筑的功能布局与空间组织上，也需贯彻节能理念。通过合理设置热区与冷区（如将人员密集的功能区设置于朝南方向），减少对暖通系统的依赖。同时，分区控制设计可以根据建筑使用特性进行空调系统的分区布置，实现对不同区域的独立调控，提高系统响应效率。例如，办公建筑中的会议室和普通办公区可以采用分时、分区的控制策略，避免能源浪费。

此外，建筑朝向、自然通风、遮阳系统等被动设计措施也是低能耗策略的重要组成部分。通过优化建筑朝向与窗墙比，合理利用自然光与自然风，可在不依赖或少依赖暖通系统的前提下，实现室内温湿度的自我调节。

2.2 能源回收与利用技术

提升暖通空调系统能效的另一个关键途径是积极采用能源回收与可再生能源技术。在超低能耗建筑中，能量回收通风系统（Energy Recovery Ventilation, ERV）和热回收新风系统（Heat Recovery Ventilation, HRV）被广泛应用 [2]。其核心原理是利用热交换器，将排出空气中的热量转移给新鲜进气，从而预热或预冷新风，减少空调系统所需的能量输入。

例如，冬季室外温度较低时，排出室内的暖空气可通过热交换装置为冷空气加热，夏季则反向进行热量转移。这一过程显著降低了空调系统的运行能耗，并提高了室内空气质量。

在可再生能源的利用方面，地源热泵（GSHP）系统因其高能效和稳定性受到广泛关注。地源热泵通过埋设在地下的换热管道系统，利用地表以下相对恒定的温度环境实现热量的交换，无论在冬季供暖还是夏季制冷中，都比传统空调系统具有更低的能耗和更高的效率。同时，太阳能系统也被广泛应用于建筑热水供应和辅助供暖，甚至可配合光伏系统为部分空调系统供电，进一步降低对传统电力能源的依赖。

2.3 智能控制与系统集成

随着智能建筑和物联网技术的发展，智能控制技术成为实现超低能耗暖通空调系统高效运行的重要手段。通过引入中央智能控制系统，可对室内温度、湿度、CO₂ 浓度、人员分布等环境数据进行实时监测与动态调节。例如，在室内无人或低使用率时，系统自动降低供冷或供热强度，既节约能耗，又保证基本环境舒适度。

此外，智能化系统可以根据气象数据预测未来温度变化趋势，提前调整系统运行策略，实现“前馈式”节能控制。基于 AI 算法的自学习控制系统还能根据历史数据不断优化运行参数，进一步提升系统运行效率和稳定性 [3]。

更为关键的是，将暖通空调系统与建筑的照明、电力、

遮阳、新风等子系统进行集成化设计，可形成一个协同工作的建筑能源管理平台。各系统间通过统一平台进行信息共享与运行调度，避免能源使用上的重复与浪费，实现系统整体最优化运行。例如，当系统检测到室内光照充足时，可自动降低照明系统能耗；或在外部温度合适的情况下，优先采用自然通风替代机械通风，从而实现能源使用的动态平衡。

3 超低能耗建筑暖通空调系统运行能效评估方法

在超低能耗建筑的实践应用中，暖通空调系统作为建筑能源消耗的主要来源，其运行效率直接关系到建筑整体的节能水平与使用成本。为了确保系统在满足室内舒适性需求的同时实现最优的能源利用，必须对其运行能效进行科学、系统的评估。运行能效评估不仅可以量化系统的实际表现，还能为后期的系统调试、运行优化以及技术改造提供数据依据和方向指导

3.1 能效评估指标的选择

在暖通空调系统运行能效评估中，指标的选择至关重要，关系到评估的准确性与实际应用的价值。常用的能效评估指标包括：

能源消耗量：这是最直接的评估参数。通常以年或月为单位，统计建筑暖通空调系统的电力、燃气或其他能源的总消耗量。该指标可用于对比系统运行前后、不同建筑之间的能效表现。

能效比（Coefficient of Performance, COP）与季节性能系数（Seasonal Energy Efficiency Ratio, SEER）：COP 表示系统单位输入功率所产生的制冷（或供热）能力，是衡量暖通空调系统性能的核心指标。SEER 则更适合用于反映全年平均效率，能更真实地评估系统在全年不同负荷条件下的实际能效。

设备与系统效率：包括空调主机、风机、水泵等关键设备的运行效率评估。通常通过测量设备在实际负载下的输入与输出功率，计算其效率。系统效率则综合考虑多个设备协同工作的整体表现，能揭示系统调度与控制策略的有效性。

室内环境舒适度：能效评估不仅仅是对“能耗低”的追求，更要兼顾“环境舒适”。因此，应将温度、湿度、空气流通性、噪声水平、CO₂ 浓度等纳入评估，确保在节能的同时满足人体舒适需求 [4]。

3.2 能效评估方法

模拟算法：模拟算法通过建筑能耗仿真软件（如 EnergyPlus、DesignBuilder、TRNSYS、IES-VE 等）对系统运行情况进行虚拟建模和仿真分析。通过输入建筑的地理位置、气象条件、建筑结构参数、空调系统构型、使用时间表等，模拟不同工况下系统的能耗和能效指标。该方法适用于设计阶段的预评估，可用于比较不同方案的节能潜力，从而优化

设计决策。

实测法：实测法是对建筑投入使用后的实际运行状态进行直接监测与评估。在建筑中安装电表、水表、热计量仪器、环境监测传感器等设备，采集系统的能耗数据与室内环境参数。通过数据分析软件对采集数据进行处理，与设计预期或标准要求进行对比，评估系统的实际能效水平。这种方法的优势在于真实性强，能准确反映系统在真实使用条件下的表现，适用于运行维护与节能诊断。

生命周期评估法（LCA）：生命周期评估方法是一种系统性分析工具，从系统的设计、制造、运输、安装、使用、维护到最终报废回收的全过程进行能源与环境影响评估。通过对暖通空调系统全生命周期的能耗进行量化，能揭示隐藏在使用之外的间接能源消耗与环境负担，进而为系统的长期可持续运行提供依据。LCA 方法适用于对新型设备或系统进行全面的环境影响评估，常与碳足迹分析结合使用。

3.3 案例分析与评估结果

以某地一栋超低能耗办公建筑为例，该建筑采用地源热泵系统作为主要的供冷供热方式，同时集成热回收新风系统和光伏发电系统。研究团队对其运行能效进行为期一年的综合评估，采用模拟计算与实测数据分析相结合的方式。

在设计阶段，利用 EnergyPlus 对暖通空调系统的不同设计方案进行了仿真，选择了综合 COP 较高、运行稳定性好的方案。系统投入使用后，建筑内部安装了能耗监测系统，对空调主机、水泵、新风系统的耗电量进行实时记录。

评估结果显示：实测平均 COP 值达到 4.2，较传统空调系统提高约 20%；系统采用热回收装置后，新风预处理过程节能率达 25%；综合能源消耗比该地区普通办公建筑平均水平低约 30%；室内环境全年温度波动维持在 21~26℃ 之间，相对湿度控制在 40%~60%，CO₂ 浓度平均不超过 800ppm，舒适性良好。

此外，通过 LCA 分析发现，该建筑暖通空调系统在其全生命周期中，使用阶段能耗占总能耗的 80% 以上，因此在运行阶段的节能措施尤为关键。太阳能光伏系统为空调系统提供了约 15% 的运行电力，进一步降低了建筑的运行碳排放。

4 超低能耗建筑暖通空调系统设计与运行能效优化策略

在超低能耗建筑中，暖通空调系统的设计与运行能效

优化是降低建筑总能耗的关键。为了进一步提高系统的能效，可以采取以下策略：

4.1 优化系统设计与集成

通过合理的系统设计，将各个子系统进行集成优化。例如，在设计阶段，可以根据建筑的实际需求和气候条件，选择适当的空调设备和系统结构，避免能源浪费。系统集成化设计能够实现设备之间的协同工作，避免不同系统之间的能源冲突，从而提高整体能效 [5]。

4.2 提升智能控制水平

智能控制技术能够根据建筑的实际需求，动态调节空调系统的运行状态，避免不必要的能源消耗。例如，可以通过传感器实时监测室内环境，自动调节温度、湿度等参数，确保室内环境的舒适性，同时最大限度地减少能量消耗。

4.3 采用可再生能源

在设计阶段，可以考虑结合太阳能、地源热泵等可再生能源技术，提高系统的能源利用效率。例如，利用太阳能加热建筑的热水系统或利用地源热泵进行空调制冷，可以有效降低对传统能源的依赖，进一步提高建筑的能效。

5 结语

超低能耗建筑暖通空调系统的设计与运行能效优化不仅是节能建筑的关键组成部分，也是实现建筑可持续发展的重要途径。通过合理的设计、先进的控制技术和可再生能源的利用，能够显著提高建筑的能效，降低能源消耗。通过对多个案例的分析和评估，本文提出了一些优化策略，希望能够为未来超低能耗建筑的设计和运行提供理论依据和实践指导。

参考文献

- [1] 吴傲立,王彬彬,岳仁亮.新风系统在我国超低能耗建筑中的应用及思考[J].制冷与空调(四川),2024,38(05):692-704.
- [2] 陆任科,潘龙,吴云强,等.宜兴高等职业技术学校超低能耗建筑设计实践[J].能源研究与利用,2024,(04):49-51.
- [3] 董生发.超低能耗建筑设计管理要点研究[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(22):78-80.
- [4] 沈念俊,唐明天,倪敬波,等.夏热冬冷地区办公超低能耗建筑技术路线分析[J].安徽建筑,2024,31(06):85-86.
- [5] 王昭俊.超低能耗建筑研究综述与展望[J].煤气与热力,2024,44(06):1-7.