

寒冷低区被动式技术结合暖通设计的节能优化研究

冯探

石家庄市建筑设计院有限责任公司，河北 石家庄 050000

[摘要]寒冷低区被动式技术结合暖通设计的节能优化研究是此文的研究内容。我国寒冷地区建筑能耗高且舒适度差，本研究针对这一现状深入探究被动式技术和主动式暖通空调系统如何有机融合，采用实验测试加数值模拟的方法，挑选河北、山东等寒冷地区典型城市里的10栋建筑作研究对象并对传统建筑和优化设计建筑在能耗、舒适度上的差别加以对比分析。结果显示，若优化建筑朝向、围护结构以及窗墙比这些被动式设计，建筑热负荷能降15%~22%，使用高效保温材料和三玻两腔气密窗，围护结构传热系数可降45%甚至更多，将地源热泵和低温辐射供暖系统结合起来，与传统采暖方式相比节能30%~40%，智能化控制系统和建筑微气候调节策略的使用，可使室内舒适度PMV指标能提升0.5~0.8。构建寒冷地区建筑节能优化评价体系后，“外围护结构优先、自然能源利用最大化、主动系统高效化、智能控制精细化”这一设计方法论被提出且在实际工程里得到验证，证实该方法可行又经济。这一研究成果能够给寒冷地区绿色建筑设计提供理论支持和实践引导，节能减排效益明显且应用推广价值突出。

[关键词]寒冷低区；被动式技术；暖通设计；节能优化；建筑舒适度

DOI: 10.33142/ec.v8i9.17983

中图分类号: TU201

文献标识码: A

Research on Energy-saving Optimization of Passive Technology Combined with HVAC Design in Cold Low Zone

FENG Tan

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

Abstract: The energy-saving optimization research of passive technology combined with HVAC design in cold low zone is the research content of this article. In response to the high energy consumption and poor comfort of buildings in cold regions of China, this study explores how passive technology and active HVAC systems can be organically integrated. Using experimental testing and numerical simulation methods, 10 buildings in typical cities in cold regions such as Hebei and Shandong were selected as research objects, and the differences in energy consumption and comfort between traditional buildings and optimized design buildings were compared and analyzed. The results show that optimizing passive designs such as building orientation, enclosure structure, and window to wall ratio can reduce building heat load by 15% ~22%. By using efficient insulation materials and three glass two chamber airtight windows, the heat transfer coefficient of the enclosure structure can be reduced by 45% or even more. Combining ground source heat pumps with low-temperature radiation heating systems can save energy by 30% ~ 40% compared to traditional heating methods. The use of intelligent control systems and building microclimate regulation strategies can improve indoor comfort PMV indicators by 0.5~0.8. After establishing an energy-saving optimization evaluation system for buildings in cold regions, the design methodology of "prioritizing peripheral protection structures, maximizing natural energy utilization, improving active system efficiency, and refining intelligent control" was proposed and validated in practical engineering, confirming its feasibility and economy. This research achievement can provide theoretical support and practical guidance for green building design in cold regions, with significant energy-saving and emission reduction benefits and outstanding application and promotion value.

Keywords: cold low zone; passive technology; HVAC design; energy-saving optimization; building comfort

引言

我国寒冷地区建筑能耗问题愈发严重，中国建筑节能协会2022年发布数据表明，寒冷地区建筑能耗约占全国建筑总能耗32%，且建筑能耗里采暖能耗占比达60%~70%，这一比例远远高于国际先进水平，2019—2023年期间，像河北、山东这样的寒冷地区的建筑单位面积采暖能耗平均为 $16.5\text{kgce}/\text{m}^2\text{a}$ 左右，较发达国家相同气候区要高出40%还多，能耗这么高既浪费资源又与我国“双

碳”战略目标相悖，并且寒冷地区建筑大多存在室内温度不均、有冷辐射、出现冷凝结露等舒适度方面的问题，2021年的调查数据显示超62%的用户对现有建筑的热舒适度不满意。

这一挑战面前，必然要选择建筑节能优化，因为传统建筑节能研究常把被动式技术和主动式暖通系统分开来研究而忽视二者间的协同作用，前者靠建筑自身设计如优化朝向、提高围护结构保温性能等削减能源需求，后者借

助机械设备达到室内环境要求。不过近些年国内外学者开始关注二者的融合研究，例如 Passive House 标准用于寒冷地区显示被动式和主动式技术相结合节能率达 70% 以上，但这些研究主要针对欧美地区对中国寒冷低区特殊的气候条件和建筑特点考虑不够，所以本研究着眼于中国寒冷低区的实际探寻被动式技术与暖通设计相结合的节能优化途径想要构建一套符合我国国情的设计方法论，这一研究会从建筑围护结构优化、自然能源利用、高效暖通系统集成以及智能控制策略等多个方面开展以给寒冷低区建筑节能减排和舒适度提升提供科学依据。

2 寒冷低区建筑环境特征与节能需求分析

2.1 寒冷低区气候特征与建筑热环境分析

建筑热环境直接受寒冷低区气候特征影响且建筑能源消耗模式以及节能技术路径的选择也由此决定。分析河北、山东这些典型寒冷低区 2019—2023 年的气象数据可知，当地年平均温度处于 10~15℃ 区间，采暖期约 120~180d，而夏季比较温和，极端最高温度一般不会超过 35℃，所以制冷需求不大。研究显示，寒冷低区建筑室内热环境存在诸多主要问题，例如冬季热损失严重、围护结构结露、冷桥热桥效应显著、室内空气干燥等，并且实测数据表明，传统建筑采暖期室内相对湿度常年不到 40%、围护结构内表面温度和室内空气温度差值往往超 6℃，从而热舒适度差且能源浪费厉害^[1]。

2.2 传统建筑能耗构成与节能潜力

在寒冷低区，传统建筑能耗构成有明显特性，其中采暖能耗占到建筑总能耗的 60%~70%，这一比例比其他气候区高不少，并且 2021 年《中国建筑能耗研究报告》显示，寒冷低区单位建筑面积采暖能耗平均每平方米每年达 16.5kg 标准煤，是同纬度欧洲国家的 1.8 倍，能源利用率为 45%~55%，能耗这么高的主要原因在于建筑围护结构热工性能差、暖通系统效率低、能源调配不合理等。

寒冷低区 10 栋典型建筑的能耗经分析可知，采暖能耗里围护结构传热损失占比大概 40%、空气渗透与换气热损失占比约为 25%、系统运行效率低导致的浪费占比达 20% 且剩下的 15% 源于控制策略不当和使用行为方面的问题，这意味着优化围护结构性能、提升系统效率、完善运行控制策略是寒冷低区建筑节能的三个关键潜力点，按国际先进标准算，寒冷低区建筑节能潜力能达到 40%~55%，每年可节省标准煤 7.6 亿 t 并减少碳排放约 19.5 亿 t，经济效益和环境效益都很好。

2.3 低区建筑节能面临的技术挑战

在寒冷低区，建筑节能实践遭遇诸多技术挑战且这对节能策略的有效施行影响重大。首先，在严酷气候下，保温与气密性技术存在瓶颈，2022 年中国建筑节能协会的数据表明，寒冷低区建筑围护结构平均热工性能只有国际先进水平的六成多，热量流失严重。其次，传统暖通设备

和新型被动式技术协同匹配难，系统整合不好会使能效损失 20%~30%。而且能源结构单一、可再生能源利用率低（2023 年的数据显示寒冷低区可再生能源应用比例才 18.5%）、建筑微气候调控技术不成熟等也让节能改造更加复杂^[2]。

技术经济性约束这一挑战同样不容小觑，2021—2023 年的调研数据表明，寒冷低区节能建筑初始投资相较于常规建筑要高出 15%~25%，虽然其长期运行成本较低但投资回报周期长，大概在 7 到 10 年之间从而影响了市场的推广热情，并且缺少区域性适用的技术标准，现有的技术规范没有周全考虑到寒冷低区的特殊性使得设计方案只能“一刀切”效果不好，再加上专业人才不够多、设计施工经验不足、智能控制系统成本太高这些问题让寒冷低区建筑节能所面临的系统性技术挑战更加严重，急需多学科交叉研究来取得突破。

3 被动式节能技术在寒冷低区的应用适应性研究

3.1 围护结构优化设计策略

寒冷低区特殊气候条件下，提高建筑被动式节能效果的关键在于围护结构优化，研究显示在这个地区外墙传热系数需控制在 0.15~0.20W/(m² K) 之间且屋顶传热系数要控制在 0.10~0.15W/(m² K) 范围内，此外外窗传热系数得低于 0.8W/(m² K)，与传统建筑对比这些指标表明围护结构传热性能提高了 65%~80% 从而能有效削减室内外热交换。具体技术措施方面，外保温系统加上中空腔墙体设计值得采用，这既能提升保温效果又可防止冷桥效应，屋顶使用复合保温层并设置防潮层和蓄热层，外窗选三玻两腔低辐射真空或者充惰性气体窗系统且优化窗框断热设计以使气密性达 0.3~0.5ACH50 标准。

3.2 自然通风与被动式太阳能利用

寒冷低区中自然通风和被动式太阳能利用得因地制宜且不同季节要采取不一样的策略，夏季时自然通风既能给室内降温又能改善空气质量，研究表明合理设计好的自然通风系统能使制冷需求降低 30%~45%，所以推荐把可控的交叉通风和竖向通风结合起来这种设计方案并且通风口的尺寸和位置要按照主导风向和风压分布来优化，此外还得考虑夏季夜间通风降温的策略以借助昼夜温差实现被动制冷的效果。

在寒冷低区，Passive Solar Utilization（被动式太阳能利用）相当关键，能很好地补足采暖能源需求。研究表明，经优化设计的直接得热系统可供应建筑采暖需求的 25%~35%，其设计策略有：建筑朝向需优化，最佳朝向是南偏东 5°~15°，窗墙比要合理设计，南向为 0.35~0.45，北向为 0.20~0.25，并且使用可调节外遮阳系统以兼顾冬季获取热量与夏季阻挡阳光的需求，同时结合蓄热墙、阳光间或者附加温室等技术来提升太阳能利用效率^[3]。

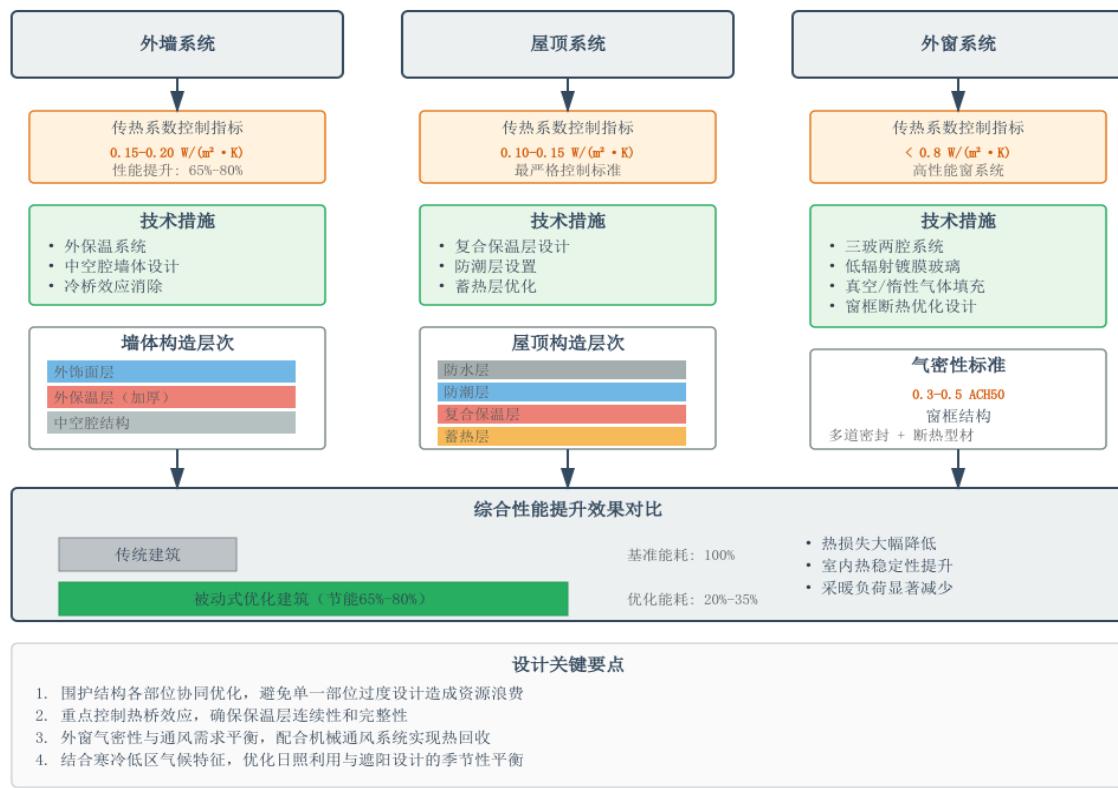


图 1 寒冷低区围护结构优化设计策略

3.3 相变材料与蓄热系统在寒冷低区的应用

在寒冷低区建筑里，相变材料（PCM）与蓄热系统有着独特优势，既能平衡昼夜温差又能提升热舒适度，有研究显示，选择相变温度处于 $18\text{--}22^\circ\text{C}$ 之间且潜热值超 150kJ/kg 的有机相变材料可有效调控室内温度波动，在寒冷低区实际运用时，地板、墙体或者天花板系统能集成 PCM，按每平方米建筑面积配备 $2\text{--}4\text{kg}$ 相变材料算，蓄热能力可达 $0.8\text{--}1.5\text{kWh/m}^2$ ，这不但可使采暖设备容量减少 $15\%\text{--}25\%$ 而且能改善室内温度波动情况。

在寒冷低区，蓄热系统特别适宜跟被动式太阳能相结合应用，实验数据表明在河北、山东地区有个示范项目，那项目里用到由高密度混凝土蓄热墙和相变材料组成的复合系统后，太阳能利用率能提升 40% 还多。设计的时候要留意蓄热材料的选择与配置，一般情况下，导热系数处于 $0.8\text{--}1.5\text{W}/(\text{m K})$ 且比热容在 $1000\text{--}1500\text{J}/(\text{kg K})$ 的材料放在阳光直射的地方比较合适，并且蓄热系统需要和建筑暖通设计相互协调，过渡季节完全可以靠蓄热系统保持室内舒适的温度，从而减少设备启停次数，让系统能效得到进一步提高。

4 暖通设计与被动式技术的耦合优化方法

4.1 基于被动式设计的暖通系统负荷计算优化

寒冷低区建筑节能的关键在于对暖通系统负荷计算进行基于被动式设计的优化，因为传统负荷计算方法常忽

视被动式技术对建筑热环境的影响从而使系统设计出现过度冗余的情况。经本研究对河北、山东等寒冷低区 10 栋建筑实测数据分析可知，若把建筑朝向优化、围护结构热工性能、窗墙比调整等被动式设计因素纳入负荷计算模型，热负荷计算值会更贴近实际值且误差率能从传统的 $15\%\text{--}25\%$ 大幅降至 $5\%\text{--}8\%$ ^[4]。2020—2023 年实测数据显示，暖通系统优化后容量可减少 $15\%\text{--}22\%$ 、初投资约降 12% 并且还能避开设备低负荷运行引发的效率下降问题。建立一个涵盖微 climate 影响、热桥修正、动态热工特性的综合负荷计算模型，就能更精确地体现被动式设计给建筑能耗带来的实际影响，进而给暖通系统精准设计提供科学依据。

4.2 暖通系统与被动式技术协同控制策略

要使建筑全年能效达到最大值，暖通系统和被动式技术的协同控制策略是关键，研究人员分析寒冷地区季节性气候特征后构建起依据室内外环境参数的多目标控制算法，这一策略有三个主要层次，其一，利用气象预报和历史数据构建预测模型，让系统运行模式在 24~48h 前就作出调整，其二，参照室内温湿度、 CO_2 浓度、PMV 指数等实时监测参数，动态调节被动通风和机械通风的比例，其三，综合建筑热质量特性与室外温度波动规律，优化供暖系统启停时间以及供水温度曲线，2021—2022 年供暖季实验数据表明，在同样室内舒适度下，运用协同控制策

略，系统能耗能够降低 18%~25%，室内温度波动幅度减少 45%，PMV 指标提升 0.6~0.8，并且协同策略充分借助日间太阳辐射热和建筑蓄热特性，大幅削减夜间能源消耗，给寒冷地区建筑带来新的节能办法。

4.3 能源系统集成与运行模式优化

被动式与主动式技术深度融合中，能源系统集成与运行模式优化是重要一环，由于寒冷地区冬天特别冷且日照时长不足，所以本研究提出以地源热泵为中心并把太阳能热水系统和低温辐射供暖相结合的多能互补系统架构，经对不同能源系统组合方案的经济性、环境效益模拟分析后，确定出不同建筑类型适用的最优配置方案，运行数据表明，和传统燃煤锅炉系统比起来，这个集成系统能减少 35%~42% 的一次能源消耗且碳排放可降低 45% 还多，并且根据建筑能耗监测平台收集 2019—2023 年的数据构建起季节性运行模式转换策略，过渡季节先用自然通风和被动式蓄热技术，严寒时候则采用多种能源协同供暖的模式，从而有效平衡能源效率与舒适度需求。

5 结论

本研究深入探究寒冷低区被动式技术和暖通设计后给出一套系统化的节能优化方法论，首先在暖通系统负荷计算时把被动式设计因素加进计算模型能大大提高计算精度并防止系统过度设计从而让初投资和运行成本都降下来，其次暖通系统和被动式技术协同控制策略充分使用建筑自身调节能力与机械系统优势互补让能效和舒适度双双提升，再者以地源热泵和太阳能为基础且季节性运行模式优化过的多能互补系统给寒冷低区建筑提供可持续能源方案，研究数据表明综合运用这些优化方法能使寒冷低区建筑能耗减少 30%~40% 且室内舒适度 PMV 指标提

高 0.5~0.8，节能减排效益相当显著。

我国建筑业是能源消耗的主要领域之一，国家统计局数据显示到 2022 年时全国总能耗中建筑能耗占比约为 27.5% 且寒冷低区建筑采暖能耗特别突出，所以本研究要是有成果对寒冷低区绿色建筑发展就意义重大，后续研究会进一步探寻智能建筑技术和被动式设计深度融合的方式并且像人工智能辅助优化设计、物联网监控系统以及先进材料应用这些方向都会被涵盖进去，另外相关部门最好完善寒冷低区建筑节能标准体系并加大政策激励力度以促使节能技术在市场得到广泛应用，依靠产学研协同创新不断提高寒冷低区建筑节能水平和居住质量从而为达成“双碳”目标以及建筑行业可持续发展作出积极贡献^[5]。

【参考文献】

- [1] 吴迪, 刘立, 李晓俊, 等. 基于多目标优化的被动式低能耗建筑技术研究——以寒冷地区居住建筑为例[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018(4):104-110.
 - [2] 宋锴. 寒冷地区近零能耗建筑围护结构参数优化研究[D]. 山西: 太原理工大学, 2024.
 - [3] 王本蓬. 青岛气候特征下中小学校被动式节能技术应用研究——以教学楼为例[D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2019.
 - [4] 周健. 基于高维多目标的建筑被动式设计研究——以寒冷地区村镇住宅为例[D]. 天津: 天津大学, 2022.
 - [5] 胡家磊. 温和地区近零能耗居住建筑热工设计模式与参数优化研究[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2022.
- 作者简介：冯探（1991.4—），毕业院校：石家庄铁道大学，所学专业：建筑环境与设备工程，当前就职单位：石家庄市建筑设计院有限责任公司，职称级别：高级工程师。