

高原寒冷地区既有建筑节能改造适宜性及经济性分析

赵娟, 周波涛, 白艺飞, 高俊梅, 强天伟

(西安工程大学 城市规划与市政工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过对拉萨某办公建筑室内外温度实测, 发现该建筑北向房间室内温度不满足供暖要求。为寻找供暖系统问题, 探究北向房间不满足要求的原因, 充分考虑高海拔、强辐射等气候因素的影响, 首先基于既有建筑的围护结构朝向差异化研究, 提出三种节能改造方案并分别进行 DeST 能耗模拟。模拟结果显示, 方案 2 改造后供暖季的总供热量比方案 1 减少了 50.79%, 方案 3 比方案 1 减少了 52.50%, 围护结构改造效果显著; 其次进行节能性分析, 对空气源热泵运行参数进行高原修正, 并提出热源设计改造方案 A(改造围护结构并加装电热膜)和方案 B(直接更换空气源热泵), 对这两种方案分别进行经济性分析。结果显示, 保留原有设备的方案 A 比方案 B 初投资费用节省 101.02 万元, 年运行费用节省 0.533 万元, 生命周期费用节省 105.38 万元, 是可以优先推广的既有建筑改造方式。

关键词: 既有建筑节能改造; 围护结构朝向差异; 空气源热泵; 经济性分析

中图分类号: TU243; TU111.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)05-0774-09

Suitability and economic analysis of existing building energy saving reconstruction in cold plateau region

ZHAO Juan, ZHOU Botao, BAI Yifei, GAO Junmei, QIANG Tianwei

(School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Through the actual measurement of indoor and outdoor temperatures of an office building in Lhasa, it was found that the indoor temperature of the north-facing rooms of the building did not meet the heating requirements. To find the heating system problems and explore the reasons why the north-facing rooms do not meet the requirements, the influence of climatic factors such as high altitude and strong radiation is considered. Firstly, based on the study of the differentiation of the envelope orientation of the existing building, three energy-saving retrofitting schemes are proposed and DeST energy consumption simulations are conducted separately. The simulation results show that the total heat supply in the heating season after the renovation of scheme 2 is reduced by 50.79% compared with scheme 1, and scheme 3 is reduced by 52.50% compared with scheme 1, so the effect of envelope renovation is remarkable; secondly, energy-saving analysis is conducted, the operating parameters of air source heat pump are modified in plateau, and heat source design renovation scheme A (renovation of envelope structure and addition of electric heat film) and scheme B (direct replacement of air source heat pump), and economic analysis was conducted for these two options respectively. The results show that Option A, which retains the original equipment, saves 1,010,200 CNY in initial investment costs, 5330 CNY in annual operating costs and 1,053,800 CNY in life-cycle costs compared to Option B. It is the preferred method of retrofitting existing buildings that can be promoted.

Key words: Energy saving transformation of existing buildings; Differences in the orientation of the envelope; Air source heat pump; Economic analysis

拉萨地处高原寒冷地区, 冬季漫长而寒冷, 夜间供暖是十分必要的^[1]。由于其特殊的地理环境, 城市热网供暖无法实现, 空气源热泵是比较常用的

收稿日期: 2022-04-28

修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金青年资金资助项目(52208125)

第一作者: 赵娟(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要研究可再生能源利用、太阳能供暖技术及相变蓄热技术等。E-mail: juanzhao1220@163.com

一种集中供暖方式。然而当地较早建设的建筑围护结构未能满足节能建筑要求,且气候条件与平原地区差异较大,空气源热泵无法达到额定制热量,加之设备运行数年之后系统性能衰减,导致很多既有建筑不满足供暖要求的情况。

围护结构节能改造已有众多学者进行了相应的研究。桑国臣等^[2]对不同朝向外墙单位面积日平均失热量进行分析,提出“传热朝向差异”的围护结构热工设计方法。李榕榕等^[3]利用 DeST 软件对四个城市的办公建筑模型进行 12 个角度朝向旋转,模拟计算全年冷、热负荷,分析朝向差异建筑对冷热负荷的影响程度,找到该地区最佳朝向。胡达明等^[4]通过 DOE-2 软件模拟计算夏热冬冷地区典型居住建筑在不同朝向时的能耗,发现建筑南北向时能耗比东西向时低 15% 左右。André Furtaido 等^[5]通过对既有建筑的外墙填充不同材料的砌体进行围护结构改造,发现最高可以提升 70% 的能效。梁秒梦等^[6]基于建筑朝向差异,对建筑进行功能分区与室内分区设计,即典型建筑。通过软件模拟不同地区既有建筑与典型建筑的室外温度、冬至日建筑耗热量,发现典型建筑模型的室温相对既有建筑模型有明显提高。Faezeh Bagheri Moghaddam 等^[7]通过软件模拟建筑在不同朝向建立绿色外墙时的能耗,发现在西北向时节能效果不明显,而在南向建立绿色外墙时建筑能耗下降 28%。崔俊奎等^[8]通过工程实测,发现既有建筑保温特性与节能标准有较大差距。通过模拟计算参数达标前后围护结构能耗差,并比较各方案的改造费用得出最优方案。黄帅帅等^[9]通过 DeST 软件模拟得出建筑围护结构各部分改造后节能情况。外墙最大热负荷节能率为 45.66%,屋面最大热负荷节能率为 4.25%,外窗最大热负荷节能率为 7.36%。F Martín-Consuegra 等^[10]研究了某小区住宅被动式改造后能效改善情况,并对围护结构改造前后室内热环境进行了分析。LM López-Ochoa 等^[11]通过全生命周期成本分析法,采用最佳方案优化围护结构并根据建筑朝向差异更改开口,以实现近零能源建筑。Lili Zhang 等^[12]通过 DeST 软件模拟计算围护结构改造时采用不同类型及厚度的材料进行外墙保温的建筑能耗,发现改造后可节省 21.52% 的供暖能耗。Claire Far 等^[13]通过 FirstRate5 热舒适模拟软件模拟了 7 种围护结构改造方案下全年累计供暖与制冷能耗,发现改造后节能效果最高可达到 71%。Lina La Fleur 等^[14]以瑞典某住宅为研究对象,提出一种生命周

期成本不变的最佳能效的优化方法。通过 OPERA-MILP 软件进行围护结构改造及能源优化,研究发现对外墙节能改造比对屋顶更符合成本效益。Axel Bruck 等^[15]通过线性规划法对欧洲地区既有建筑节能改造展开研究,得出了不同气候区和建筑类型的节能改造阈值。刘晓君等^[16]建立了既有住宅建筑节能改造评价指标体系,并运用模糊综合评判法建立了既有建筑节能改造项目的判定模型,为既有建筑节能改造提供了决策依据。Yan-gluxi Li 等^[17]通过矩阵法建立了围护结构优化模型,探究了不同影响因素对建筑能耗的影响,得出减少通风口,增加保温材料厚度可以有效降低能耗。何梅等^[18]以内蒙古地区住宅建筑为研究对象,通过 DeST 软件计算不同窗户的冬季采暖负荷,对几种节能窗用于不同朝向的房间的节能率进行对比,为严寒地区的既有住宅建筑节能改造窗户选择提供依据。Shahryar Habibi 等^[19]通过模拟的方式,研究了在屋顶铺设光伏板的节能改造方式,得出在屋顶铺设光伏板不仅可以增强建筑保温性能,而且提高了光伏板发电效率。李峥嵘等^[20]通过对贵州地扠侗寨传统民居围护结构改造前后室内温湿度进行现场实测,发现砖墙结构能更好地稳定室内温湿度。以上学者对围护结构改造进行了研究,但拉萨地区建筑能耗不仅受围护结构影响,还和供暖热源有关。高鹏程等^[21]对空气源热泵机组在严寒地区的运行效果进行了分析。结果表明热泵机组随室外空气温度的降低会出现制热量不足的情况。李欣林等^[22]对拉萨地区空气源热泵进行实验测试,分析实验结果发现空气源热泵在高原环境下受空气温度低等不利因素的影响其全负荷运行下的制热量、性能系数明显降低。Michael Chesser 等^[23]在对爱尔兰某建筑进行节能改造时,对不同室外环境下空气源热泵性能进行测试,发现室外温度为 7℃ 时,空气源热泵的 COP 比额定 COP 低 16%。Jihong Pu 等^[24]通过实验探究结垢对空气源热泵性能的影响,发现污垢对加热模式下的空气源热泵性能的影响会随着空气温度的降低而加剧。王洋涛等^[25]为解决空气源热泵在室外空气温度降低、负荷需求增大时制热量减小的问题,提出单价能效系数的概念优化了空气源热泵及辅助电加热供暖的耦合方式,提高了供暖系统的节能性和经济性。

以上研究分别对不同朝向的围护结构差异、空气源热泵的高原修正进行了探讨,但并未基于高原寒冷地区强辐射、低密度的特殊气候条件,

提出主动与被动相结合的既有建筑节能改造综合优化方案。本文通过对当地建筑实测数据分析,充分考虑到气象条件和地理因素的影响,采用DeST能耗模拟软件实施了针对不同朝向有差异的围护结构改造方案,并对空气源热泵运行参数进行高原修正,针对不同方案进行初投资和运行费用的综合性经济性分析,得到较好的既有建筑节能改造方案。

1 供暖季室内热环境实测

该建筑共5层,总面积为5 200 m²,其中供暖面积为4 118 m²。建筑采用空气源热泵作为空调热源形式,室内末端设备为风机盘管。冬季室内供暖设计温度为18℃,供回水温度为45/40℃。

该测试选择4个办公室房间做室内热环境监测,分别取南北向四个房间,其平面布置如图1所示。

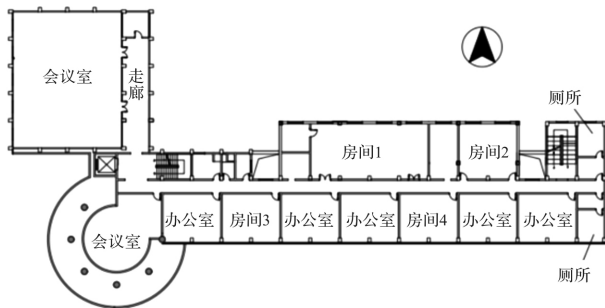


图1 办公建筑典型层平面图

Fig. 1 Typical floor plan of office building

房间3未开启风机盘管,其他房间均供暖。温湿度记录仪分别记录12月25日与12月27日10:00~18:00室内外温度数据,温度曲线如图2所示。

由图2可知,温度曲线按照被测房间号从高到低排列为:房间4>房间3>房间1>房间2。房间1与房间2为北向房间,房间1空间大,室内温度低,全天大部分时间都温度低于18℃。房间2空间小,风机盘管一直开启,且电热器取暖的情况下才能保证室内温度。根据房间工作人员解释,北向房间全天都比较冷,需要空调供暖;房间3与房间4为南向房间,南向房间温度在10:00时温度与北向房间温度较为接近。之后温度上升较快,至13:00温度最高达到24℃,之后再22℃左右波动。据房间工作人员介绍,该房间温度较为舒适,仅在早晨需要开空调,其余时间依靠太阳辐射可满足温度要求。

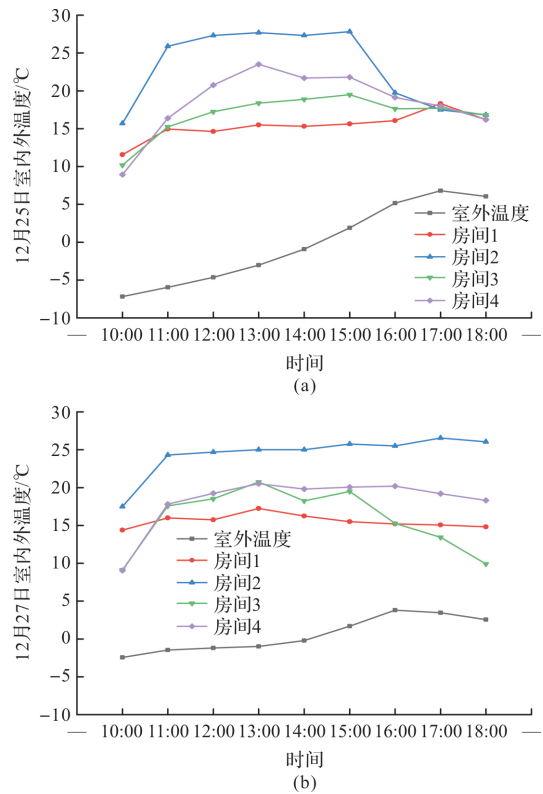


图2 实测室内外温度曲线

Fig. 2 Measured indoor and outdoor temperature curves

从室内外环境测试结果可以看出,室内热环境与外墙保温有很大的关系,对于高原寒冷地区,由于太阳辐射强度大、昼夜温差大、天空背景辐射强等因素,南北外墙应采用不同的保温措施,北外墙可强化保温性能以防止热量散失,南外墙可适度弱化保温强度并加大窗墙比,从而强化白天传热,以提高室内温度,但居住建筑等夜间使用的房间需要考虑夜间散热传热,要综合比较白天得热量与夜间失热量以确定墙体保温措施。

2 能耗模拟分析

2.1 建立模型及参数设置

根据以上测试结果及建议,考虑对围护结构进行改造以降低室内热负荷。采用DeST软件建立该建筑模型,并进行不同围护结构方案的能耗模拟。其DeST模型如图3所示。

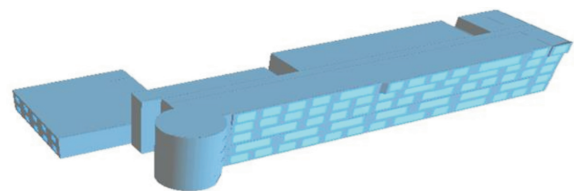


图3 DeST模型三维视图

Fig. 3 DeST model to the selected public building

初始模型围护结构材料根据设计施工图纸设定, 围护结构各部分具体材料及参数详见表 1。

表 1 初始模型围护结构参数

Tab. 1 Initial model enclosure structure parameters

围护结构	材料及厚度
外墙	混凝土墙-气-200
	20 mm 石灰砂浆-200 mm 多孔混凝土-
	20 mm 石灰砂浆
内墙	180 混凝土隔墙
	20 mm 水泥砂浆-180 mm 碎石或卵石-
	20 mm 水泥砂浆
窗	普通中空玻璃-12 mm 外窗;
	普通中空玻璃-9 mm 内窗
门	商场玻璃外门; 木质内门

其中外墙传热系数为 $0.859\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; 传热系数为 $2.569\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$; 外窗类型为 $6+12\text{A}+6$, 玻璃层数为两层, 传热系数 K 为 $2.9\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, 太阳能得热系数为 72.2% 。

室内环境参数具体设定如下:

(1)室外气象参数: 采用拉萨地区典型年的逐时气象数据。

(2)内扰设定: 软件内扰部分详见表 2。

表 2 室内参数

Tab. 2 Indoor parameters

室内参数	办公建筑
人员密度	办公室 0.1 人/m^2 ; 会议室 0.3 人/m^2
灯光功率	10 W/m^2
设备功率	20 W/m^2
供暖温度	$18\text{ }^\circ\text{C}$

(3)系统设定: 建筑内每个空调房间设定独立风机盘管系统, 采暖时间 2 为每年的 11 月 4 日至

次年的 3 月 19 日, 共计 136 d。采暖运行时间设定为每天 9:00-19:00。

2.2 建筑热负荷计算

通过 DeST 模拟计算得到该建筑最大热负荷为 246.95 kW , 其供暖季逐时负荷曲线如图 4 所示。

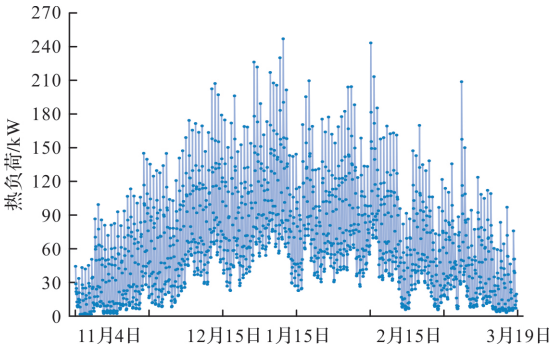


图 4 建筑供暖季逐时负荷

Fig. 4 Building heating season hourly load

计算该建筑各房间热负荷, 并对所选房间全年热负荷进行统计, 统计结果见表 3。

表 3 典型房间供暖季热负荷统计

Tab. 3 Heat load statistics of typical room heating season

房间名称	房间功能	房间面积/ m^2	最大单位面积热负荷/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$	房间最大热负荷/ kW	采暖季平均单位面积热负荷/ $(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
房间 1	会议室	260.64	118.75	30.95	38.59
房间 2	会议室	117.00	88.83	10.39	24.11
房间 3	办公室	51.50	53.40	2.75	0.14
房间 4	办公室	51.50	52.12	2.68	0.11

3 供暖系统能耗诊断

该建筑主要暖通设备见表 4。

表 4 主要暖通设备表

Tab. 4 Main HVAC equipment table

序号	名称	型号及规格	单位	数量	备注
1	离心式水泵	KQL100/300-7.5/4	台	2	采暖热水泵
		$H=250\text{ kPa}$, $G=35\text{ m}^3/\text{h}$			
		$N=7.5\text{ kW}$			
2	低温型风冷热泵机组	LAWM200HT/2 4 D	台	4	正常启动温度: $-8\sim 45\text{ }^\circ\text{C}$
		额定制冷/热量: $60/70\text{ kW}$ 输入功率: $26.6(\text{冷})/29.1(\text{热})$ 压降: 45 kPa			
3	卧式暗装风机盘管	LFC-LR300 三排管, 额定制热量 $4\,900\text{ W}$	台	2	$L=520\text{ m}^3/\text{h}$
		LFC-LR500 三排管, 额定制热量 $8\,080\text{ W}$	台	22	$L=880\text{ m}^3/\text{h}$
		LFC-LR600 三排管, 额定制热量 $9\,860\text{ W}$	台	41	$L=1\,020\text{ m}^3/\text{h}$

该建筑供暖季最大热负荷为 246.95 kW , 低温型风冷热泵额定制热量为 $70\text{ kW}\times 4\text{ 台}=280\text{ kW}$ 。基本满足要求, 但工程中需考虑机组老化、锈蚀

或受室外环境影响导致制热量下降等问题, 参考李欣林^[16]对拉萨地区风冷热泵实际制热量随室外温度变化衰减的研究, 结合本文研究的室外情况

得出实际制热量在 38.1~63 kW 之间,且仅在下午 17:00 左右太阳热辐射最大时达到 60 kW,故取最不利状况每台机组实际制热量为 38.1 kW。四台机组共 152.4 kW 小于建筑供暖季最大热负荷,故该机组不满足要求。针对机组不满足要求的情况,一般处理方法是更换一套大功率的热水机组。但是这种方法存在两种弊端,①更换一套新机组的投资费用较高;②换用更大功率的热水机组对于南向房间存在热量浪费的情况,且运行费用明显增大。因此提出两步走的改造方案:首先进行围护结构的节能改造,降低室内热负荷;再对热源进行不同方案经济性比选。

4 围护结构节能改造

为降低建筑能耗,首先对围护结构进行优化,优化后围护结构热工参数应满足西藏自治区民用建筑节能设计标准^[26]。围护结构优化具体参数见表 5。

表 5 围护结构优化具体参数

Tab. 5 Specific parameters of enclosure structure optimization

围护结构类型	保温方案	材料参数	保温层厚度
外墙	EPS 外墙薄抹灰系统	导热系数 0.041	50 mm
	LOW-E 保温外窗	W/(m ² ·K), 传热系数 1.61	
外窗	LOW-E 保温外窗	W/(m ² ·K), 太阳得热系数 44%	
屋顶	XPS 板外保温系统	导热系数 0.289	50 mm
		W/(m ² ·K)	

根据该设计标准,该办公建筑位于拉萨属于寒冷地区(C),体形系数为 0.27 满足要求;建筑南向窗墙比为 0.5 满足要求;优化前屋面传热系数为 0.595>0.45 不满足节能标准,优化后为 0.289 满足要求;优化前外墙传热系数为 0.595>0.55 不满足节能标准,优化后为 0.45 满足要求;优化前外窗传热系数为 2.9>2.0 不满足节能标准,优化后为 1.61 满足要求。

围护结构原始参数为方案 1,选择两种改造方案,方案 2 在原始建筑基础上,按表 5 的围护结构参数在北向外墙、屋顶上添加保温材料,北向外窗采用表 5 参数;方案 3 为建筑所有外墙、屋顶、外窗根据表 5 的参数进行改造。

通过 DeST 对优化后的办公建筑模型进行室内外温度、供暖季热负荷模拟计算。在不供暖的情况下,4 个典型房间室内温度值低于供暖设计温度 18℃ 的时刻数如图 5 所示。

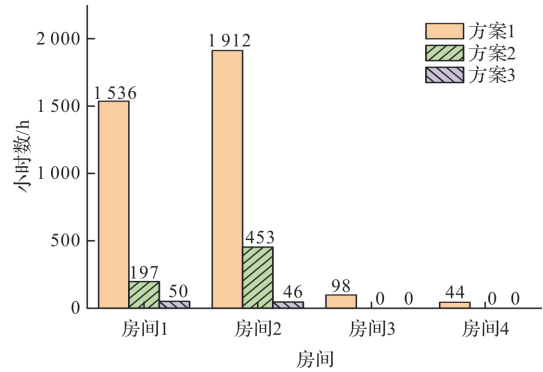


图 5 各房间供暖季温度低于 18℃ 小时数统计图

Fig. 5 Statistical chart of hours when the temperature of each room is below 18℃ in heating season

由图 5 可知,在不供暖情况下,方案 1 中房间 1、2 位于北向,室内温度低于 18℃ 的小时数分别为 1 536 h 和 1 912 h,房间 3、4 位于南向,房间温度低于 18℃ 的小时数仅为 98 h 和 44 h;根据方案 2 对围护结构进行改造后,室内温度低于 18℃ 的小时数大幅下降,房间 1、2 为 197 h 和 453 h,而南向的两个房间温度全部达到 18℃ 以上;方案 3 的改造使所有房间在不供暖时,大部分时间都可以满足室内温度要求,房间 1、2 为 50 h 和 46 h,南向的两个房间温度全部达到 18℃ 以上。

三种方案下四个房间供暖季逐时热负荷分布情况如图 6 所示。对于房间 1,围护结构改造前平均日供热量为 112.22 MJ/d;围护结构按照方案 2 和方案 3 改造后,平均日供热量分别为 72.92 MJ/d、69.74 MJ/d;房间 2 三种方案下平均日供热量分别为 77.27 MJ/d、56.39 MJ/d、43.59 MJ/d;房间 3 三种方案下平均日供热量分别为 1.35 MJ/d、0.19 MJ/d、0.05 MJ/d;房间 4 三种方案下平均日供热量分别为 0.54 MJ/d、0.48 MJ/d、0.01 MJ/d。

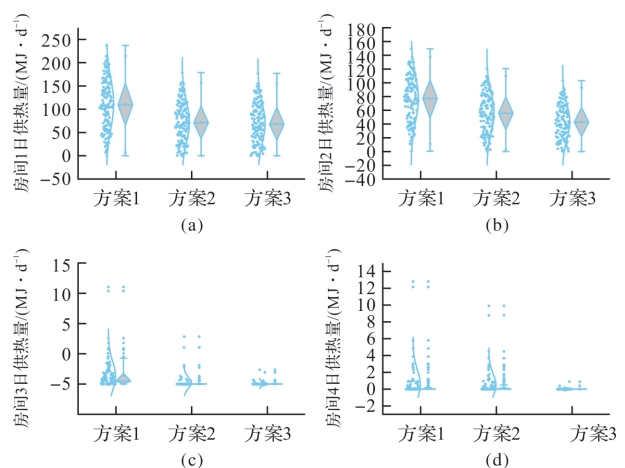


图 6 各典型房间日供热量曲线图

Fig. 6 Daily load curve of each typical room

如图 7 所示, 三种方案最大热负荷值分别为: 246.40、203.99、148.82 kW; 供暖季总供热量分别为: 355.21、246.78、168.73 GJ, 按照方案 2 和 3 进行围护结构改造后, 总供热量分别减少了 30.5%和 52.5%.

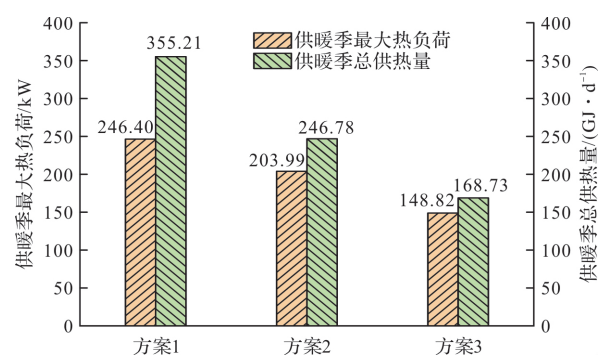


图 7 供暖季最大热负荷和总供热量
Fig. 7 Maximum heat load and total heat supply in heating season

5 热源改造方案及经济性分析

为了进一步满足室内热舒适要求, 需要对热源进行改造. 本文提出两种方案, 方案 A 为不改变原有空气源热泵供暖系统, 根据方案 2 进行围护结构改造, 且仅在北向房间外墙内侧壁面敷设电热膜进行辅助供暖; 方案 B 为不进行围护结构改造, 更换所有空气源热泵机组.

原空气源热泵型号为 LAWM200HT/2 | 4 | D, 该设备在拉萨地区运行时, 室外温度低于 0℃ 的小时数为 1 503 h, 最低可达 -16℃. 运行环境空气温度极低, 且运行数十年后机器本身存在的老化、磨损等问题导致实际制热量远低于额定值热量. 文献[22]分析了该机组实际制热量、输入功率随室外温度的变化曲线, 得到拉萨地区空气源热泵机组制热量高原修正系数, 如表 6 所示.

表 6 拉萨地区空气源热泵机组制热量高原修正系数^[16]
Tab. 6 Plateau correction coefficient of heat production of air source heat pump chiller and hot water unit in Lhasa area

室外温度/℃	-12~-11	-10~-5	-4~0	1~5	6~10
高原修正系数 K	0.84	0.83	0.82	0.81	0.8

根据空气源热泵相应性能曲线, 结合表 6 所示的高原修正系数, 线性拟合得到原有机组和新机组在拉萨运行的制热量、输入功率函数关系式,

如公式(1)~(4)所示.

$$y_1^* = 1.09(x) + 45.6 \tag{1}$$
$$y_2^* = 0.12(x) + 20.36 \tag{2}$$
$$y_1 = K[1.93(x) + 66.66] \tag{3}$$
$$y_2 = 0.64(x) + 21.32 \tag{4}$$

式中: x 为室外温度,℃; K 为空气源热泵制热量高原修正系数; y_1^* 为原有机组制热量, kW; y_2^* 为原有机组功率, kW; y_1 为新机组制热量, kW; y_2 为新机组功率, kW.

根据拉萨逐时气象参数, 室外温度在 -11~10℃ 之间变化时, 根据公式(1)~(4)得到两机组逐时制热量和功率的逐时统计值, 如图 8 所示.

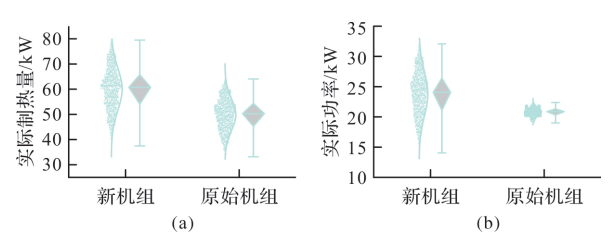


图 8 新机组与原始机组逐时制热量及逐时功率统计图
Fig. 8 Hourly heat and hourly power statistics of new unit and original unit

从图可知, 旧机组的制热量在 27.85~51.24 kW 之间, 平均制热量为额定制热量的 56.7%. 逐时功率在 18.99~22.38 kW 之间, 平均功率为额定功率的 70.6%; 新机组的制热量在 37.47~68.81 kW 之间, 平均制热量为额定值热量的 82%, 逐时功率在 14.04~27.68 kW 之间, 平均功率为额定功率的 78%. 由以上数据可知, 对于高原地区, 应充分考虑到室外环境因素对空气源热泵制热量的影响, 不能按照额定制热量来选型.

5.1 方案 A 经济性分析

原有空气源热泵型号为 LAWM200HT/2 | 4 | D, 该设备实际制热量已不能满足室内供暖要求, 需要增加电热膜辅助供热. 根据市场调研, 电热膜选型及价格如表 7 所示.

表 7 电热膜选型
Tab. 7 Selection of electric film

名称	型号	制热量/(kW·h·m ⁻²)	价格 ^[27] /(元·m ⁻²)	数量 m ²
电热膜	HX-100	0.22	93	274.73

围护结构改造初始投资(人工费折入单价)包括: EPS 外墙薄抹灰系统的材料费用、Low-E 玻

璃费用、屋顶 XPS 保温材料的费用以及不满足房间电热膜费用. 初始投资费用如表 8~9 所示.

表 8 围护结构改造方案 2 初始投资费用表

Tab. 8 Initial investment cost of envelope structure renovation Scheme 2

名称	数量/m ²	单价/(元·m ⁻²)	费用/万元	共计/万元
EPS 外墙薄抹灰系统	1 267.58	60	7.604	23.58
Low-E 玻璃	160	347	5.552	
XPS 保温材料	1311.96	60	7.872	
HX-100 电热膜	234.6	93	2.555	

表 9 围护结构改造方案 3 初始投资费用表

Tab. 9 Initial investment cost of envelope structure renovation Scheme 3

名称	数量 m ²	单价(万元·m ⁻²)	费用/万元	共计/万元
EPS 外墙薄抹灰系统	3 550.34	60	21.302	54.23
Low-E 玻璃	722	347	25.053	
XPS 保温材料	1311.96	60	7.872	
HX-100 电热膜	0	93	0	

拉萨地区民用电价以 0.5 元/kW·h 计, 围护结构按照方案 2 改造后空气源热泵供暖季耗电量为 $2.746\,4\times 10^4$ kW·h, 运行费用为 1.37 万元/a; 空调系统总耗电量为 6.03×10^4 kW·h, 运行费用为 3.015 万元/a. 空气源热泵能耗约占空调系统总能耗的 46%; 供暖季使用电热膜总耗电量为 467.58 kW·h, 费用合计 0.002 4 万元/a; 方案 2 运行费用共计 3.017 万元.

根据 DeST 软件模拟计算结果, 方案 3 围护结构改造后供暖季总供热量为 168.73 GJ, 空调系统总耗电量为 5.19×10^4 kW·h, 则空调系统运行费用为 2.59 万元/a.

5.2 方案 B 经济性分析

根据方案 B, 考虑高原修正以及最不利情况下空气源热泵制热能力, 选择空气源热泵 7 台, 由造假通查得价格为 17.8 万元/台, 总费用为 124.60 万元. 该空气源热泵额定制热量为 70 kW, 额定功

率为 29.1 kW. 方案 1 的围护结构参数下空气源热泵总耗电量为 3.866×10^4 kW·h, 空调系统总耗电量为 7.105×10^4 kW·h, 供暖季空气源热泵运行费用为 1.93 万元/a, 空调系统总运行费用为 3.55 万元/a, 空气源热泵能耗占空调系统总能耗的 54%.

5.3 整体经济性分析

根据文献[28], 本文选择生命周期费用法作为经济指标, 项目的生命周期取 20 年, 基准折现率取 12%. 计算得: 方案 A 的生命周期费用为 48.263 万元, 方案 B 的生命周期费用为 153.643 万元, 根据以上分析, 将前面各方案的初投资、运行费用及生命周期费用汇总如表 10 进行比较.

表 10 各方案对比分析

Tab. 10 Comparative analysis of all schemes

方案及费用	方案 A		方案 B
	方案 2	方案 3	
初投资/万元	23.58	54.230	124.600
运行费/万元	3.017	2.590	3.550
生命周期费用/万元	48.263	75.420	153.643

如表 10 所示, 围护结构改造方案 2 的生命周期费用比方案 3 节约 27.16 万元/a, 所以优先推荐方案 2. 则对于方案 A, 初投资为 23.58 万元, 年运行费用为 3.017 万元; 对于方案 B, 初投资为 124.60 万元, 运行费用为 3.55 万元/a; 综合分析, 方案 A 较方案 B 初投资节省 101.02 万元, 运行费用节省了 0.533 万元/a. 生命周期费用节省了 105.38 万元/a. 以上分析表明方案 A 经济性更好, 是可以优先推广的既有建筑改造方式.

6 结论

对拉萨某办公建筑室内外温度实测, 发现南北向房间热负荷差异巨大、北向房间温度不满足供暖要求. 为进一步探究以拉萨为代表的高原寒冷地区节能改造措施, 本文采用全生命周期费用为指标, 从围护结构节能改造和热源改造两个方面进行优化, 得出以下结论:

(1)对拉萨某办公建筑进行室内外温度实测, 结果显示, 南向房间 3 和 4 温度较为舒适, 满足采暖要求; 北向两个房间室内温度低, 开启空调后室内温度大部分时间低于 18℃, 不满足采暖要求. 为解决此问题, 提出围护结构改造;

(2)分别采用方案 1(未改造)、方案 2(北向围护结构改造)和方案 3(全部围护结构改造)进行

DeST 能耗模拟,模拟结果显示,方案2改造后在供暖季的总供热量为 246.780 GJ,比方案1减少了 50.79%;方案3改造后在供暖季的总供热量为 168.732GJ,比方案1减少了 52.5%,围护结构改造效果显著;

(3)为进一步满足室内热舒适要求,提出方案A(改造围护结构并加装电热膜)和方案B(直接更换空气源热泵)。对这两种方案分别进行经济性分析后得出:方案A初投资为 23.58 万元,年运行费用为 3.017 万元;方案B初投资为 124.600 万元,年运行费用为 3.55 万元;从经济性分析结果来看,方案A较方案B,初投资费用节省 101.02 万元,年运行费用节省 0.533 万元,生命周期费用节省 105.38 万元,是可以优先推广的既有建筑改造方式。

参考文献 References

- [1] 肖榆川. 基于热环境优化的拉萨居住建筑空间模式研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.
XIAO Yuchuan. Research on Spatial Model of Residential Buildings in Lhasa Based on Thermal Environment Optimization[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2020.
- [2] 桑国臣,方倩,王文康,等. 太阳能建筑外墙传热系数朝向差异设计研究[J]. 太阳能学报,2018,39(12): 3440-3450.
SANG Guochen, FANG Qian, WANG Wenkang, et al. Study on difference of heat transfer coefficient in difference facing orientation exterior wall of solar building[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2018, 39(12):3440-3450.
- [3] 李榕榕,程晓喜,黄献明,等. 基于日照影响下冷热负荷计算的公共建筑“最佳朝向”反思[J]. 建筑学报,2020(11):99-104.
LI Rongrong, CHENG Xiaoxi, HUANG Xianming, et al. Reflections on the optimal building orientation based on the analysis of cooling-heating loads affected by solar parameters[J]. Architectural Journal, 2020(11):99-104.
- [4] 胡达明,陈定艺,单平平,等. 夏热冬暖地区居住建筑朝向对能耗的影响分析[J]. 建筑节能,2017,45(5): 57-60.
HU Daming, CHENG Yiding, SHAN Pingping, et al. Influence of residential building orientations to energy consumption in hot summer and warm winter zone[J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2017, 45(5):57-60.
- [5] FURTADO A, RODRIGUES H, AREDE A, et al. A experimental characterization of seismic plus thermal energy retrofitting techniques for masonry infill walls[J]. Journal of Building Engineering 2023,75.
- [6] 梁秒梦. 太阳能建筑非均匀节能构造及热环境分析[D]. 西安:西安理工大学,2017.
LIANG Miaomeng. Non-uniform energy-saving structure and thermal environment analysis of solar building[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2017.
- [7] MOGHADDAM F B, MIR J M, YANGUAS A B, et al. Building orientation in Green facade performance and its positive effects on urban landscape case study: An urban block in barcelona[J]. Sustainability 2020, 12, 9273.
- [8] 崔俊奎,陈杰,包文增. 寒冷地区公共建筑围护结构改造与节能分析[J]. 建筑技术,2020,51(3):4.
CUI Junkui, CHEN Jie, BAO Wenzeng. Reconstruction and energy saving analysis of public building envelope structure in cold area[J]. Architectural Technology, 2020,51(3):4.
- [9] 黄帅帅,李炎,崔景东,等. 寒冷地区某既有办公建筑围护结构优化改造研究[J]. 制冷与空调(四川),2020,34(2):9.
HUANG Shuaishuai, LI Yan, CUI Jingdong, et al. Research on optimization and transformation of envelope structure of an existing office building in cold area[J]. Refrigeration & Air Conditioning(SI CHUAN), 2020, 34(2):9.
- [10] CONSUEGRA F M, FRUTOS F D, OTEIZA I. Minimal monitoring of improvements in energy performance after envelope renovation in subsidized single family housing in madrid [J]. Sustainability, 2020, 13.
- [11] OCHOA L L, CASAS L H, GONZALEZ L L, et al. Energy renovation of residential buildings in cold mediterranean zones using optimized thermal envelope insulation thicknesses: The case of Spain[J]. Sustainability, 2020, 12(6):2287.
- [12] ZHANG L L, LIU Z A, HOU C P, et al. Optimization analysis of thermal insulation layer attributes of building envelope exterior wall based on DeST and life cycle economic evaluation[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019; 100410.
- [13] FAR C, FAR H. Improving energy efficiency of existing residential buildings using effective thermal retrofit of building envelope[J]. Indoor and Built Environment

- ,2019,28(6):744-760.
- [14] FLEUR L L, ROHDIN P, MOSHFEGH B. Investigating cost-optimal energy renovation of a multifamily building in Sweden [J]. *Energy and Buildings*, 2019:109438.
- [15] BRUCK A, DIAZ RUANO S, AUER H. Values and implications of building envelope retrofitting for residential Positive Energy Districts [J]. *Energy and Buildings*, 2022: 275.
- [16] 刘晓君,王瑾. 基于西安市既有住宅性能的节能改造项目优选研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2013,45(5):732-737.
- LIU Xiaojun, WANG Jing. Research on the optimization of energy-saving renovation projects based on the performance of existing residential buildings in Xi'an [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition)*, 2013,45(5): 732-737.
- [17] LI Y, CHEN L. A study on database of modular façade retrofitting building envelope [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 214: 1098-1133.
- [18] 何梅,石颜博. 严寒地区既有居住建筑节能改造窗户节能效果研究——以内蒙古地区为例[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2013,45(4):554-558.
- HE Mei, SHI Yanbo. Study on the energy saving effect of window energy saving reconstruction of existing residential buildings in severe cold area-Taking Inner Mongolia as an example[J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2013,45(4):554-558.
- [19] HABIBI S, OBONYO E A, MEMARI A M. Design and development of energy efficient re-roofing solutions [J]. *Renewable Energy*, 2020, 151: 1209-1219.
- [20] 李峥嵘,曾诗琴,赵群,等. 贵州地扞侗寨传统民居围护结构改造对室内热湿环境影响[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2016,48(6):908-911.
- LI Zhengrong, ZENG Shiqing, ZHAO Qun, et al. The influence of enclosure structure transformation of traditional dwellings in Dimen Dong Village of Guizhou on indoor thermal and humid environment [J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2016,48(6):908-911.
- [21] 高鹏程,王昭俊,刘畅等. 严寒地区被动房热泵空调机组冬季性能测试与分析[J]. *暖通空调*, 2023,53(6): 120-123,69.
- GAO Pengcheng, WANG Zhaojun, LIU Chang, et al. Performance test and analysis of heat pump air conditioning units of a passive house in severe cold zone in winter [J]. *Journal of HV&AC*, 2023, 53(6): 120-123,69.
- [22] 李欣林. 拉萨地区空气源热泵供暖应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- LI Xinlin. Application Research on Air Source Heat Pump Heating in Lhasa [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [23] CHESSER M, LYONS P, REILLY P, et al. Air source heat pump in-situ performance [J]. *Energy and Buildings*, 2021: 1113-1124.
- [24] PU Jihong, SHEN Chao, YANG Haotian, et al. Investigating heat transfer and frosting performance of air source heat pumps with the impact of particulate fouling [J]. *Energy for Sustainable Development*, 2021: 194-203.
- [25] 王洋涛,赵润俐,田琦. 空气源热泵及辅助电加热地板辐射采暖系统耦合优化[J]. *华侨大学学报:自然科学版*, 2019,40(5): 661-667.
- WANG Yangtao, ZHAO Runli, TIAN Qi. Coupling optimization of air source heat pump and auxiliary electric heating floor radiant heating system [J]. *Journal of Huaqiao University (Natural Science)*, 2019,40(5): 661-667.
- [26] 西藏自治区住房和城乡建设厅. 西藏自治区民用建筑节能设计标准 DBJ540001—2016 [M]. 西藏自治区住房和城乡建设厅, 2016
- Department of Housing and Urban-Rural Development of Tibet Autonomous Region of the People's Republic of China. Design Standard for Energy Efficiency of Civil Buildings DBJ540001—2016 [M]. Department of Housing and Urban-Rural Development of Tibet Autonomous Region, 2016.
- [27] Alibaba Group. Taobao, 2022 [Online]. Available: <https://m.tb.cn/h.UydECdH?tk=KydvdkAh8iq>. [Accessed 02 January 2022].
- [28] 刘焯,燕达,江亿. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第10讲暖通空调方案的经济性分析[J]. *暖通空调*, 2005,35(5):12.
- LIU Ye, YAN Da, JIANG Yi. Building environment design simulation analysis software DeST Lecture 10 Economic analysis of HVAC scheme [J]. *Journal of HV&AC*, 2005,35(5): 60-70,78.

(编辑 桂智刚)