

# 关中地区公共建筑近零能耗关键技术研究

王智刚<sup>1</sup>, 李 立<sup>1</sup>, 赵 峰<sup>1</sup>, 姚宝珩<sup>1</sup>, 岳英俊<sup>2</sup>, 倪平安<sup>2</sup>

(1. 西安高新技术产业开发区房地产开发有限公司, 陕西 西安 710065; 2. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为了探究陕西关中地区公共建筑适宜的近零能耗建筑技术, 通过对已建成的典型近零能耗公共建筑进行研究, 重点从该建筑的围护结构热工性能和气密性设计等方面, 探索了近零能耗建筑关键节能技术。结合有限元分析软件对围护结构的重要节点进行二维传热分析, 分析不同构造节点的热损失分布。采取压差法对房间进行检测, 得出了主要房间的气密性指标。基于多维监测数据, 分析了该建筑的室内外温湿度和空气质量, 并进一步探讨了该建筑的节能潜力。结果表明: 该建筑的外围护节点构造做法能降低热桥效应, 各节点线性热桥传热系数  $\psi$  在满足标准限值的同时能有效降低建筑的热损失。房间气密性测试得出平均换气次数 0.25 次/h, 满足近零能耗建筑标准。根据环境测试分析, 在冬季和夏季室内每层最低温度和最高温度均在 20~26 °C 之间波动, 围护结构具有良好的热工性能。建筑能源消耗主要依靠清洁能源, 该建筑在少量能源消耗的情况下能较好的维持室内环境的热舒适, 可为陕西关中地区的近零能耗公共建筑设计提供参考。

**关键词:** 近零能耗; 公共建筑; 关中地区; 关键技术

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)05-0718-10

## Key technologies of nearly zero energy for public building in Guanzhong

WANG Zhigang<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, ZHAO Feng<sup>1</sup>, YAO Baoheng<sup>1</sup>, YUE Yingjun<sup>2</sup>, NI Pingan<sup>2</sup>

(1. Xi'an High-Tech Industrial Development Zone Real Estate Development Co, Xi'an 710065, China;

2. College of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to explore appropriate nearly zero-energy building technologies for public buildings in the Guanzhong region of Shaanxi, the key energy-saving technologies for nearly zero-energy buildings were explored through a study of a typical completed nearly zero-energy public building, focusing on the thermal performance of the building's envelope and air tightness design of the building. Combined with finite element analysis software, two-dimensional heat transfer analysis was performed on the important nodes of the envelope structure to analyze the heat loss distribution of different structural nodes. The differential pressure method was adopted to test the rooms, and the air tightness indexes of the main rooms were derived. Based on the multidimensional monitoring data, the indoor and outdoor temperature and humidity and air quality of the building were analyzed, and the energy saving potential of the building was further discussed. The results show that the construction of the building envelope nodes can reduce the effect of thermal bridge, and the linear thermal bridge heat transfer coefficient of each node can effectively reduce the heat loss of the building while meeting the standard limit. The airtightness test of the room shows that the average number of air changes is 0.25 times/h, which meets the standard of nearly zero energy consumption building. According to environmental testing and analysis, the minimum and maximum indoor temperature per floor fluctuates between 20 ~ 26 °C in both winter and summer, with excellent thermal performance of the envelope. The building energy consumption mainly relies on clean energy, thus the building can better maintain the thermal comfort of the indoor environment with a small amount of energy consumption, which provides a reference for the nearly zero-energy public building design in the Guanzhong region of Shaanxi.

**Key words:** nearly zero energy; public building; Guanzhong; key technologies

收稿日期: 2022-01-09

修改稿日期: 2022-10-08

基金项目: 住房和城乡建设部 2022 年科学技术项目计划(2022-S-005)

第一作者: 王智刚(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事绿色建筑和健康建筑方面的研究。E-mail: wangzg@gaokegroup.com

通信作者: 李 立(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事绿色建筑和健康建筑方面的研究。E-mail: lili123@gaokegroup.com

建筑行业是能源消耗与碳排放“大户”,2018年建筑全寿命周期的能耗和碳排放量分别占全国能源消费总量和碳排放的46.5%和51.2%<sup>[1]</sup>。因此对近零能耗建筑的应用开展研究,有助于加快近零能耗建筑在我国的推广,对于应对能源危机、实现“双碳”目标,具有重要而深远的意义。

近零能耗建筑的理念起源于1976年丹麦Torben V. Esbensen教授提出的“零能耗住宅<sup>[2]</sup>”,此后多国学者对近零能耗建筑的应用和实施开展了广泛的研究<sup>[3-5]</sup>。我国对于“近零能耗建筑技术”引进较晚,从2002年中瑞超低能耗建筑合作到2019年《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)<sup>[6]</sup>的颁布实施,中国多地完成了近零能耗建筑的实践<sup>[7]</sup>。国内相关学者也对近零能耗建筑技术在我国的应用进行了深入地研究。其中部分学者<sup>[8-12]</sup>依据近零能耗建筑实例探究了近零能耗建筑技术在不同建筑类型中的应用;部分研究<sup>[13-16]</sup>针对不同气候区的气候特点、建筑形式等,探究近零能耗建筑技术的“本地化”,寻求因地制宜的近零能耗建筑设计;也有学者<sup>[17-20]</sup>着重于探讨适用于近零能耗建筑的不同技术措施。这些研究促进了近零能耗建筑技术的发展,为近零能耗建筑在不同地区、不同建筑类型的应用提供了参考。

然而,当前对于近零能耗建筑技术的研究大多集中于对近零能耗居住建筑的模拟分析,运用模拟与实测综合分析近零能耗公共建筑的研究还较为缺乏。模拟分析可以为近零能耗建筑的设计提供指导,对多种技术措施下的建筑运行情况进行预测;而实测分析则通过建筑室内环境检测和运行能效指标评估,反映建筑的实际运行情况,为建筑为各种技术措施的效果进行评价,以此优化建筑的实际运行。因此,结合模拟与实测分析,可对近零能耗建筑技术的效果进行预测与验证,为技术措施的改进提供参考。鉴于此,本文以陕西关中地区已建成的近零能耗公共建筑为例,分析该建筑所采用的关键技术,通过模拟对围护结构的重要节点进行传热分析。此外,结合大量的室内外环境测试和建筑运行数据,分析该建筑在实际运行过程的热工性能和室内环境指标,为关中地区近零能耗建筑的发展提供参考与借鉴。

## 1 方法与材料

### 1.1 热桥计算原理

热桥是指建筑围护结构中某些部位与周边存在传热性能的不同,且在室内外温差下这些部位热流相对密集,造成围护结构内表面温度较低(或

较高)的区域。常规节能建筑设计行业常用的节能计算软件有2种热桥计算形式:一种为计算线性热桥并代入围护结构的平均传热系数中,简称为热桥算法,另一种为主断面传热系数与修正系数的乘积,简称为修正系数法<sup>[21]</sup>。本研究采用劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)研发的二维有限元传热分析模型THERM对重要节点进行传热分析,线性热桥传热系数 $\phi$ 的计算方法如下<sup>[22]</sup>。

$$\phi = L^{2D} - \sum_{j=1}^n U_j \times L_j \quad (1)$$

式中: $L^{2D}$ 二维热桥的导热系数, W/(m·K);  $U_j$ 为一维元素的传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $L_j$ 为适用于二维几何模型中的长度, m;  $n$ 为一维元素的个数。由于围护结构由多层材料结构组成,根据《民用建筑热工设计规范》(GB 50176—2016)的要求,热桥采用围护结构的平均传热系数按下式计算<sup>[23]</sup>:

$$K_m = K + \frac{\sum \phi_j l_j}{A} \quad (2)$$

式中: $K_m$ 为围护结构的平均传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $K$ 为围护结构平壁传热系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $\phi_j$ 为围护结构上的第 $j$ 个结构性热桥的线传热系数 W/(m·K);  $l_j$ 为围护结构第 $j$ 个结构热桥的计算长度, m;  $A$ 为围护结构的面积, m<sup>2</sup>。

### 1.2 气密性检测原理

本次测试主要对建筑外围护结构整体气密性能进行检测,依据《建筑物气密性测定方法 风扇压力法》<sup>[24]</sup>,采取压差法进行检测。测试前需计算建筑内部体积、围护结构总面积、墙与屋顶面积、地板净面积等,并记录室内外温度、风速、风压等相关计算参数。测试过程中需关闭被测空间所有有影响的外部开口,打开所有的内门;关闭带有内部风口的供暖装置、机械通风器和空调系统,并封闭机械通风末端和空调系统末端。建筑气密性的检测结果需要计算应符合50 Pa和-50 Pa压差下的换气次数,计算过程如下。

$$N_{50}^+ = L_{50}^+ / V \# \quad (3)$$

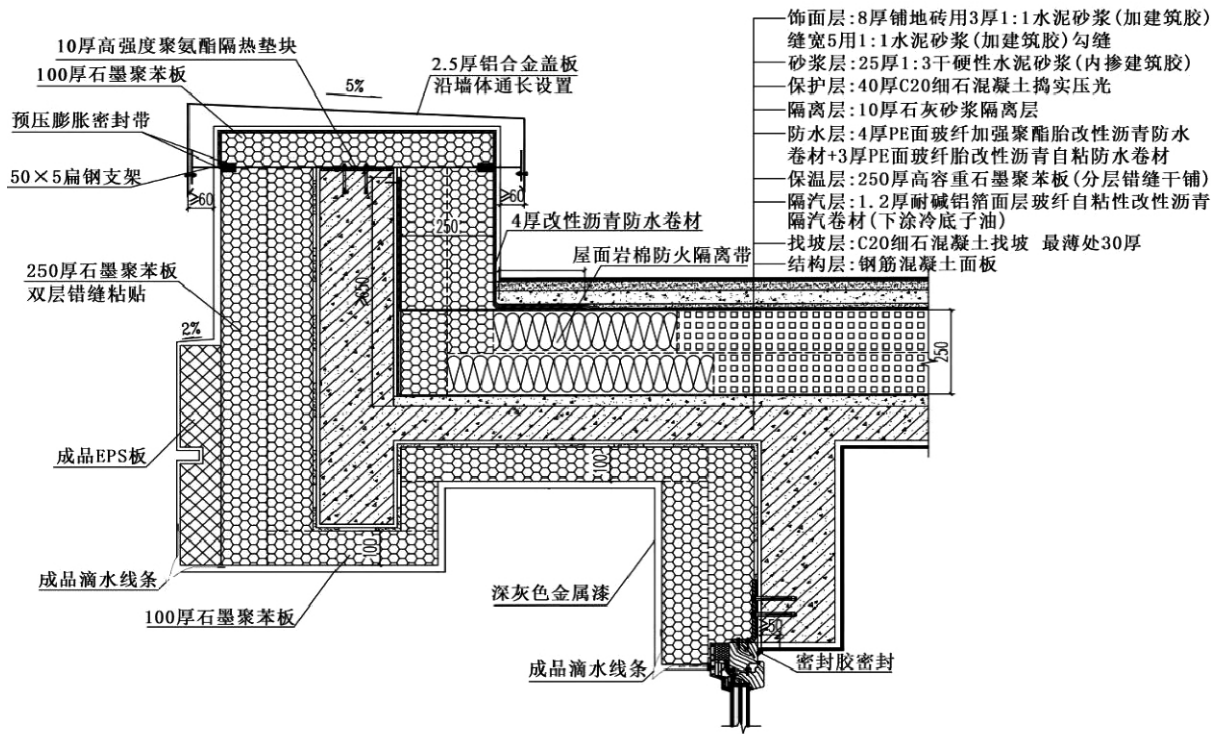
$$N_{50}^- = L_{50}^- / V \# \quad (4)$$

式中: $N_{50}^+$ 、 $N_{50}^-$ 分别为室内外压差50 Pa和-50 Pa下房间的换气次数 h<sup>-1</sup>;  $L_{50}^+$ 、 $L_{50}^-$ 分别为室内外压差50 Pa和-50 Pa下空气流量的平均值, m<sup>3</sup>/h;  $V$ 为被测房间或建筑的换气体积, m<sup>3</sup>。建筑或被测空间的换气次数应按式计算。

$$N_{50} = \frac{N_{50}^+ + N_{50}^-}{2} \# \quad (5)$$

式中: $N_{50}$ 为室内外压差50 Pa条件下,建筑或房间的换气次数。





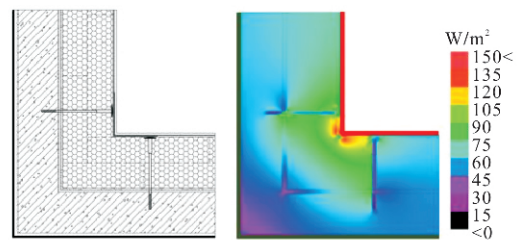
(b) 屋面保温及女儿墙做法节点详图

图2 围护结构保温节点详图

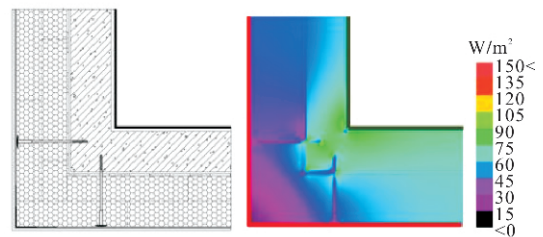
Fig. 2 Detail drawing of insulation nodes of building envelope

## 2.2 无热桥构造设计

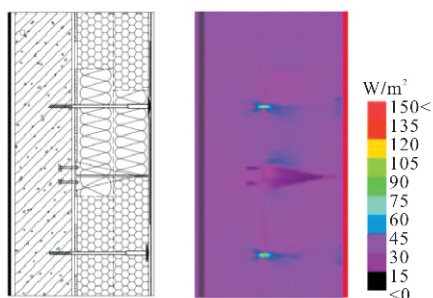
建筑外围护结构保温性能提高后, 热桥成为影响围护结构保温效果、室内环境舒适度及建筑能耗的重要因素。对易产生热桥的部位如外保温的铺贴及固定方式与固定锚栓、墙角处、外墙上固定龙骨支架等不同部位均采取相应的削弱或消除热桥的措施处理, 以保证建筑整体尽量无热桥, 最大限度减少因热桥对建筑节能及舒适度的影响。本研究采用 THERM 对外围护结构的重点部位进行二维传热分析, 得到不同节点的热损失分布情况。如图3所示, 采用无热桥的节点处理后, 节点a-e的外边界和内边界间无明显的热桥, 尤其消除了保温与墙体之间的金属连接件所带来的热桥影响, 线性热桥传热系数值 $\psi$ 分别为0.146, 0.187, 0.114, 0.163, 0.632均能较好的符合《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)的要求。



(b) 外墙阴角热桥模拟分析

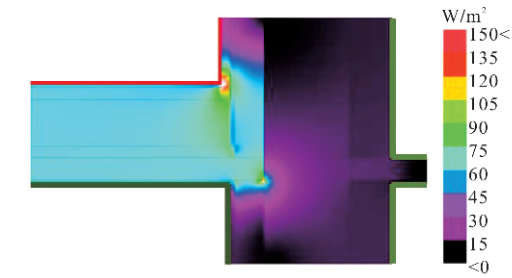


(c) 外墙阳角热桥模拟分析

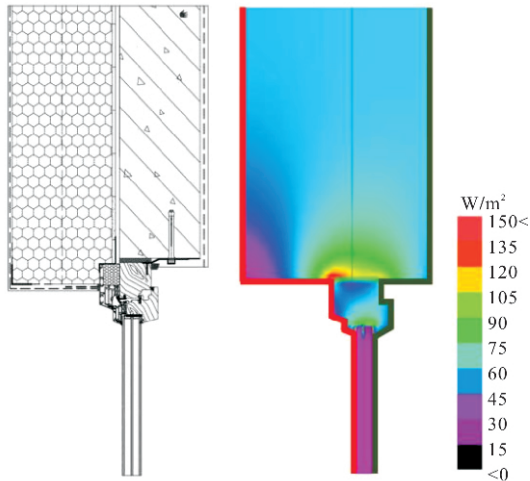


(a) 外墙热桥模拟分析





(d) 楼板热桥模拟分析



(e) 外窗热桥模拟分析

图3 关键节点的热桥模拟分析图

Fig. 3 Key nodes of thermal bridge simulation analysis diagram

### 2.3 建筑气密性设计

建筑气密性对于降低建筑能耗、提高室内环境质量起到关键性作用。项目在建筑设计阶段明确标注气密层的位置,保证气密层连续,并包围整个外围护结构(图4)。

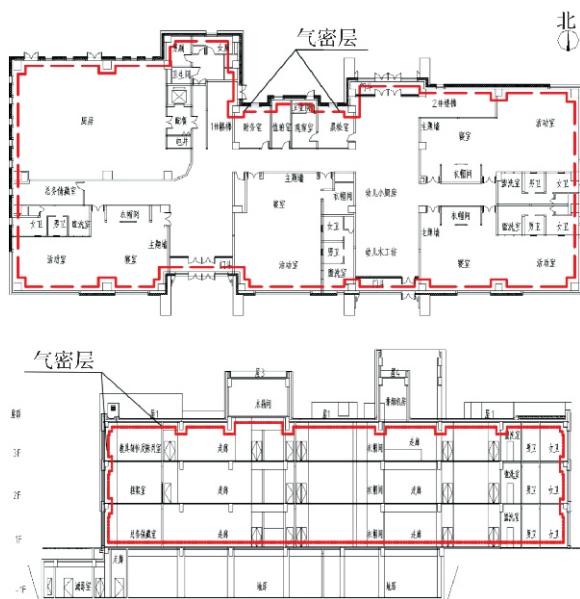


图4 该项目1~3层气密区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the air tightness zone of layers 1~3 of the project

项目气密性设计涉及到采用高气密性的建筑外门窗,外门窗与洞口之间缝隙的气密性处理,维护结构洞口、接线盒、管线穿越处等易发生气密性问题的部位,不同围护结构交接处、以及排风等设备与围护结构交界处的密封节点设计等。典型的气密性设计涉及的节点做法见图5。

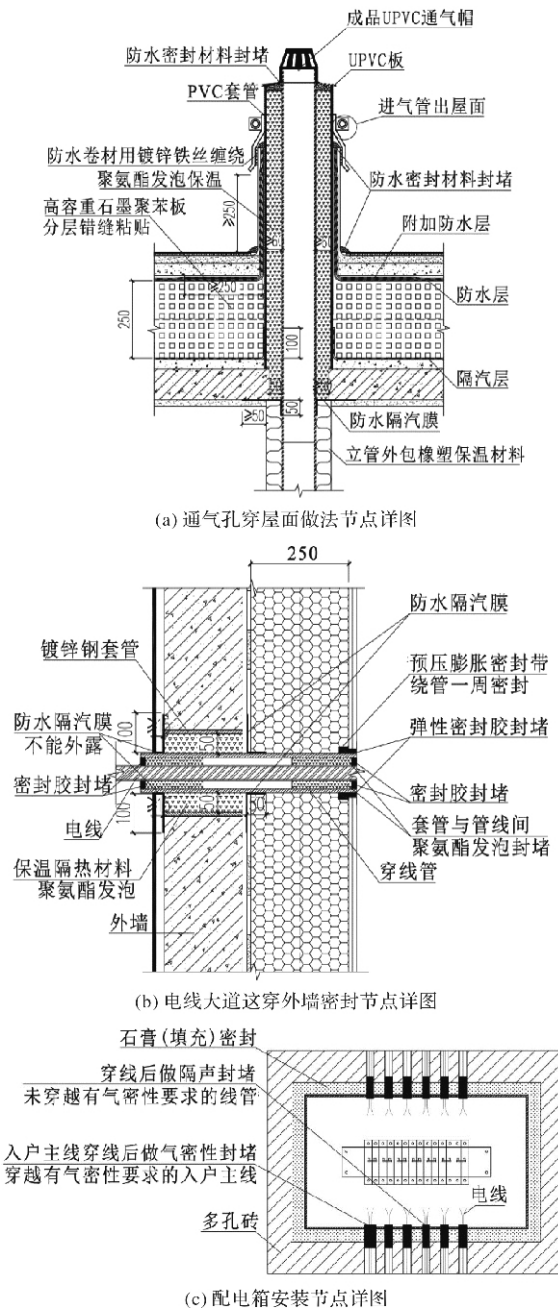


图5 部分节点气密性做法

Fig. 5 air tightness practice of some nodes

### 2.4 主动式高性能能源系统

项目采用高效热回收新风系统,通过回收利用排风中的能量降低新风负荷需求(图6)。全热回收效率75%,单位风量风机耗功率 $0.19 \text{ W}/(\text{m}^3/\text{h})$ ,满足近零能耗标准要求,初级过滤效率大于90%,中级PM2.5过滤效率达到95%。

空调采用直流变速多联式中央空调系统，主机采用直流变速、变制冷剂流量空调系统，可根据房间负荷自动调节。多联机制冷性能系数为  $3.65 > 2.8$ ，制冷综合性能系数 IPLV 为  $8.5 > 6.0$ ，制热性能系数  $COP > 1.8$ ，均满足节能标准要求，最大程度地降低建筑供暖供冷设备能耗。

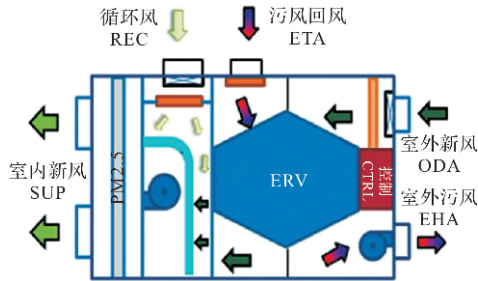


图 6 热回收新风系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of heat recovery ventilation system

2.5 可再生能源利用

为实现近零能耗建筑的能效指标，项目在屋面设置了高效的太阳能光伏系统和太阳能+空气源热泵集中供应热水系统。光伏发电系统由 1 个光伏子系统构成，共设置光电转换效率超过 16% 的多晶硅电池组件 400 块(图 7)。光伏板面积约 200 m<sup>2</sup>，设计总装机容量峰值不小于 25.5 kWp(峰值)。太阳能+空气源热泵集中供应热水系统设计为产热量 6 000 L/d。同时这些太阳能设备与新风系统机组还共同构成了屋面的遮阳构件，在降低顶层建筑的能耗方面发挥了重要的作用。

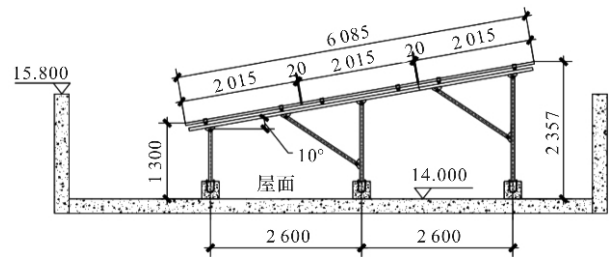


图 7 屋面太阳能光伏节点

Fig. 7 Nodes of solar photovoltaic Installed on the roof

3 测试与分析

通过对该建筑 1~3 层室内环境和室外环境进行测试，是检验和评价近零能耗建筑综合性能的有效途径。因此，本研究以室内环境指标温度、湿度、PM2.5、二氧化碳浓度背景参数，并作为本次分析依据的背景环境因素。测试设备型号与精度参数如表 1 所示，数据采样频率为 4 次/h(每天采样为 96 次)。本次测试从 2020 年 12 月 1 日至 2021 年 5 月 31 日，其中 12 月~3 月期间室内维修及监测设备调试、断网等情况造成部分数据缺失，根据原有数据对缺失数据进行修复和插值处理。其中对 1、2 层最低温湿度数据进行了少量的插值处理，对 3 层最低温度和最低湿度数据进行了数据修复性替换，其中 12 月 10 日至 12 月 15 日数据为 6 d 均值；12 月 16 日和 17 日的数据为 2 日均值；1 月 22 日至 1 月 24 日为 3 d 均值，5 月 18 日至 5 月 24 日为 7 d 均值，5 月 28 至 5 月 31 日为 4 d 均值。

3.1 气密性验收测试

本研究采取压差法对外围护结构整体气密性能进行检测，测试时将 ZN-07 与一台风机连接进行检测。选择建筑的主出入口为鼓风机门的安装位置，安装鼓风机、风机、检测主机等设备，将检测主机和风机通过等压管、数据线安装 TEC-TITE 检测软件的电脑连接。本次测试通过输入不同的检测压差值，测试建筑压差检测间隔为  $\pm 5$  Pa，检测范围为  $\pm 25$  Pa~ $\pm 60$  Pa。此外，分别进行负压检测和正压检测，负压检测时风机向室外鼓风，正压检测时风机向室内鼓风，通过主机对各个压差下的空气流通量进行数据采集，并对取样点进行拟合得出建筑物在室内外压差 50 Pa 时的空气渗透量。通过气密性测试，取得负压 0.24 次/h，正压 0.25 次/h，平均换气次数 0.25 次/h 的结果，因此该项目具有良好的气密性。

表 1 环境监测设备参数与精度

Tab. 1 Parameters and accuracy of environmental monitoring equipment

器材名称	品牌	规格型号	采集内容及精度
大气环境空气质量监测仪	中立格林	TF9	①环境温度：范围 0~50℃，分辨率 0.01℃； ②相对湿度：范围 0~99%RH，分辨率 0.01%RH； ③PM2.5 浓度：范围 0~1 000 μg/m <sup>3</sup> ，分辨率 1 μg/m <sup>3</sup> ； ④二氧化碳 CO <sub>2</sub> ：范围 400~2 000 ppm，分辨率 1 ppm。
室内空气质量探测器	中立格林	TSP-1618	

3.2 环境运行测试与分析

3.2.1 室内外温度

如图 8 所示，通过对该项目室内 1~3 层室内最低温度、室内最高温度和室内平均温度与室外

最低温度和最高温度的曲线进行比较分析，进而分析该建筑的热工性能。就整体的趋势而言，在室外温度变化波动较为剧烈的情况下，项目 1~3 层的总体温度波动较小。室外最低温度和最高温

度从12月到5月波动上升,室外最低温度 $-9.05^{\circ}\text{C}$ ,室外最高温度 $36.68^{\circ}\text{C}$ ,而室内每层温度最低温度和最高温度在 $20\sim 26^{\circ}\text{C}$ 之间波动,围护结构具有良好的抗外扰能力。此外,就整体建筑

而言,1~3层的总体变化趋势较为一致(图8d),由此可知建筑空间的整体热稳定性较好,建筑内部的温度分布较为均匀,进而能有效改善人居环境的舒适度。

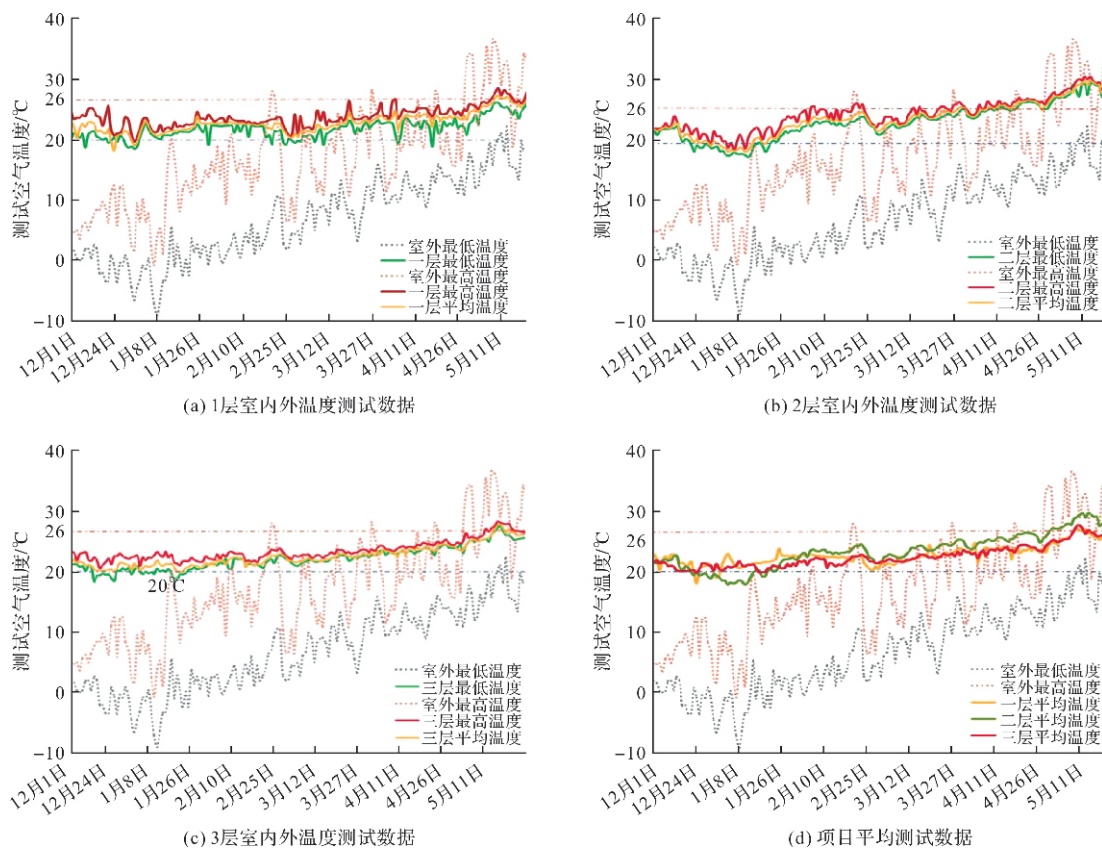


图8 室内温度测试数据分析

Fig. 8 Analysis of indoor temperature test data

### 3.2.2 室内外湿度

建筑湿度是影响环境舒适性的重要环境参数之一,对项目空间的湿度进行测试,进而分析空间湿度的分布范围。如图9所示,根据测试所得项目的室内1~3层室内最低湿度、室内最高湿度与室外最低湿度和最高湿度的曲线进行对比分析。室外湿度整体的波动较为剧烈,最低为 $9.39\%$ ,最高为 $96.11\%$ 。室内每层温度最低湿度和最高湿度基本在 $30\%\sim 60\%$ 间波动,总体的空间湿度波动幅度相对较小。就整体的测试数据变化趋势而言,1层的波动幅度大于3层的波动幅度,2层的湿度稳定性最佳。此外,项目1~3层的湿度总体变化趋势与室外的变化较为一致,但室内湿度变化随季节变化的幅度得到了有效的削弱,进而提升了室内空间热湿环境的稳定性。

### 3.2.3 室内外空气质量

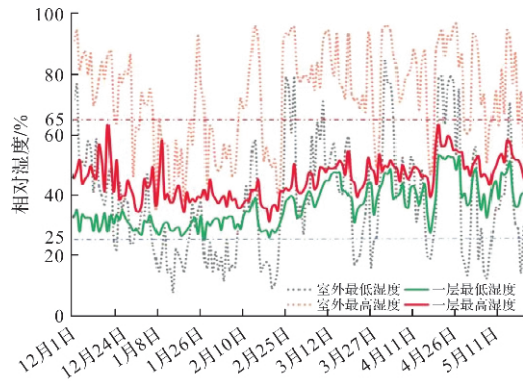
在提升建筑气密性的同时,有效保证室内空气质量对建筑中人员的身体健康具有重要的意义,本研究对项目的室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 $\text{CO}_2$ 浓度进行

了长期测试,测试结果如图10所示。从11月15日至12月10日测试得出项目室内1~3层室内和室外 $\text{PM}_{2.5}$ 数据进行分析(图10(a))。总体而言,1~3层空间的室内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于室外空间,仅有部分时间的2层空间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数值高于室外的数值。此外,进一步分析测试周期中室内空间的 $\text{CO}_2$ 浓度数据(图10(b)),参照欧洲标准 EN 15215-2007,在我国近零能耗建筑中,对于人员密集场所二氧化碳的体积浓度控制要求,满足《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350—2019 关于 $\text{CO}_2$ 的人员长期停留区域室内二氧化碳体积分浓度的 $900\text{ ppm}$ ,整体室内空气质量达到“优等”水平。

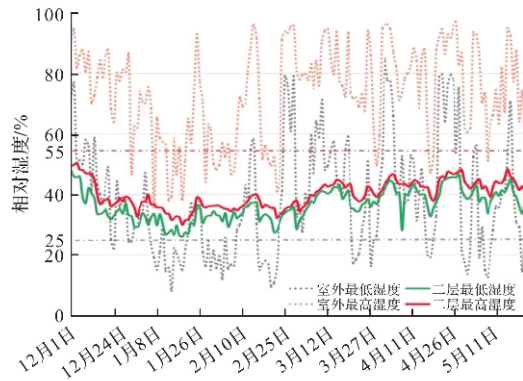
### 3.3 节能潜力分析

在能耗监测的时间段内,对每层VRV空调、VRV末端、照明及设备、新风系统、电辅热(12月开启9 d,1月31 d,2月20 d)的每月各项能耗进行统计,光伏发电量减去总能耗即剩余的光伏发电量。如图11所示,经过对测试数据进行分析,该建筑在冬季的采暖能耗指标约为 $10.5\text{ kWh}/(\text{m}^2)$

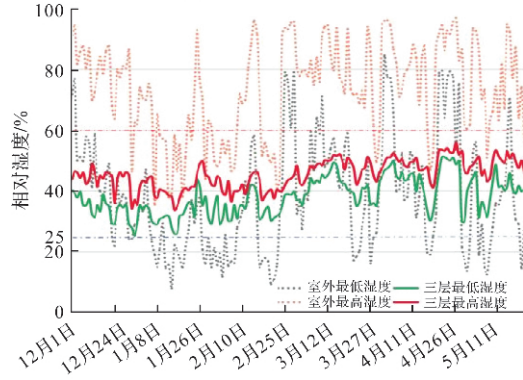




(a) 1层室内外湿度测试数据



(b) 2层室内外湿度测试数据

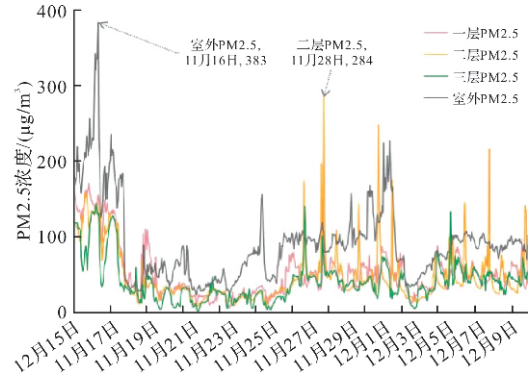


(c) 3层室内外湿度测试数据

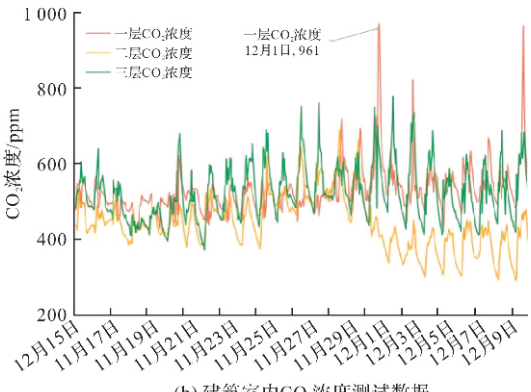
图9 建筑室内湿度测试分析

Fig. 9 Test and analysis of indoor humidity of the building · a), 远低于《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019 中寒冷地区限值为  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  的要求. 此外, 由于该项目位于寒冷气候区, 在冬季采暖季对建筑自然通风工况进行测试, 能有效评价该建筑物的被动式节能潜力. 本研究选取关中地区最冷月(1月11日—1月18日)进行对该建筑的自然通风工况下的室内温度进行测试, 测试结果如图12所示. 根据数据分析可知, 室外温度日最高温度低于  $15^\circ\text{C}$ , 最低温度接近  $0^\circ\text{C}$ , 室内各层平均温度均维持  $16\sim 20^\circ\text{C}$ ; 采用高效的围护结构能有效提升建筑空间的稳定性, 在有效保证室内空间的舒适度, 降低建筑物的能源消耗, 具有较好的节能潜力.

根据对该项目的光伏发电监测数据进一步分



(a) 建筑室内外PM2.5测试数据



(b) 建筑室内CO浓度测试数据

图10 建筑室内外环境质量测试分析

Fig. 10 Test and analysis of indoor and outdoor environment quality of the building

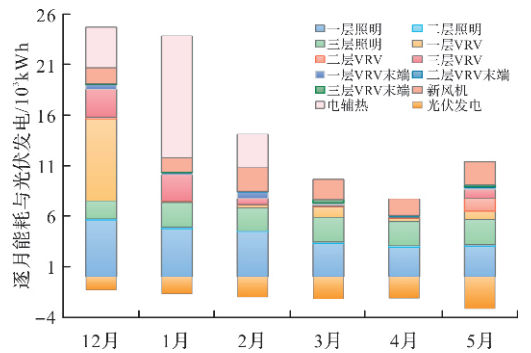


图11 逐月各项能耗与光伏发电统计

Fig. 11 Monthly statistics of energy consumption and photovoltaic power generation

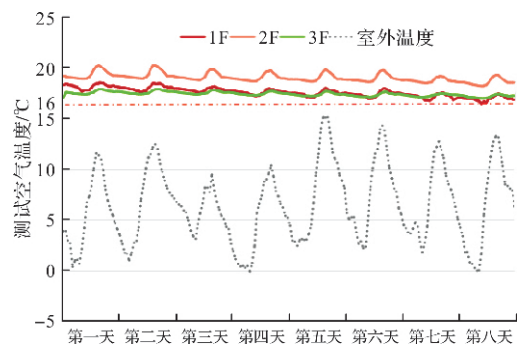


图12 自然通风工况的温度测试分析

Fig. 12 Test and analysis of temperature under natural ventilation condition



析,从12月1日至5月31日,共计发电182 d,平均每天发电68.9 kWh. 其中在2月24日发电量最少为3.9 kWh,4月28日发电量在最大148 kWh. 经过测试分析,该项目的可再生能源利用率约为18.47%,满足《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019中近零能耗公共建筑的可再生能源利用率 $\geq 10\%$ 的要求,在此基础上为建筑空间清洁能源替代提供了更加有效的保障.

## 4 结论

以陕西关中地区的某典型近零能耗公共建筑为例,分析了该地区的近零能耗公共建筑设计关键技术. 结合有限元模拟分析围护结构的重要节点,并通过实测分析建筑环境参数和运行数据进一步论证设计方案的可靠性. 基于此,得出以下结论:

(1)对该建筑的关键节点进行二维传热分析,通过无热桥设计的关键节点能有效降低围护结构的热损失,各个节点的线性热桥传热系数 $\psi$ 均能满足标准的限值;

(2)对该建筑运行效果进行实测可知:在被动式建筑设计、主动式高性能能源系统和可再生能源利用三个重要技术路径指导下,项目采取多项关键节能技术,达到了良好的气密性和稳定舒适的室内环境,满足了近零能耗建筑要求;

(3)结合各项能耗和太阳能发电的监测数据分析可知:结合可再生能源利用,该建筑在少量能源消耗的情况下能较好的维持室内环境的热舒适.

## 参考文献 References

- [1] 中国建筑节能协会. 中国建筑能耗研究报告 2020[J]. 建筑节能(中英文), 2021,49(2):1-6.  
China Association of Building Energy Efficiency. China building energy consumption research report 2020[J]. Building Energy Efficiency, 2021,49(2):1-6.
- [2] ESBENSEN Torben V, KORSGAARD Vagn. Dimensioning of the solar heating system in the zero energy house in Denmark[J]. Solar Energy, 1977, 19(2): 195-199.
- [3] STAHL W, VOSS K, GOETZBERGER A. The self-sufficient solar house in Freiburg[J]. Solar Energy, 1994,52(1):111-125.
- [4] JÜRGEN Schnieders, WOLFGANG Feist, LUDWIG Rongen. Passive houses for different climate zones[J]. Energy & Buildings, 2015,105.
- [5] SUN Yongjun. Sensitivity analysis of macro-parameters in the system design of net zero energy building[J]. Energy & Buildings, 2015,86.
- [6] 中国建筑科学研究院有限公司,河北省建筑科学研究院. 近零能耗建筑技术标准:GB/T 51350—2019[S]. 北京:中国建筑出版社,2019:5-14.  
China Academy of Building Research, Hebei Academy of Building Research. Technical standard for nearly zero energy buildings:GB/T 51350—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019:5-14.
- [7] 中国建筑科学研究院有限公司. 中国超低/近零能耗建筑最佳实践案例集[R]. 北京:中国建筑节能协会被动式超低能耗建筑分会, 2017  
China Academy of Building Research. Nearly zero energy building collection [R]. Beijing: China Passive Building Alliance, 2017
- [8] 姜雷,胡忆南. 苏南村镇近零能耗住宅性能指标研究[J/OL]. 工业建筑:1-11[2022-11-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.tu.20220629.1807.002.html>  
JIANG Lei, HU Yinan. Study on performance index of near-zero energy consumption residence in towns of southern Jiangsu province [J/OL]. Industrial Construction:1-11[2022-11-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2068.tu.20220629.1807.002.html>.
- [9] 王志刚,祝秀娟,周蕾,等. 山地新闻中心近零能耗建筑分析与设计[J]. 暖通空调, 2022,52(6):105-110.  
WANG Zhigang, ZHU Xiujuan, ZHOU Lei, et al. Analysis and design of near-zero building for Mountain News Center[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2022,52(6):105-110.
- [10] 高彩凤,陈梦源,彭莉,等. 近零能耗公共建筑技术经济性分析[J]. 建筑科学, 2021,37(10):170-178.  
GAO Caifeng, CHEN Mengyuan, PENG Li, et al. Techno-economic analysis of nearly zero energy public buildings[J]. Building Science, 2021,37(10):170-178.
- [11] 李怀,于震,吴剑林,等. 某近零能耗办公建筑4年运行能耗数据分析[J]. 建筑科学, 2021,37(4):1-8.  
LI Huai, YU Zhen, WU Jianlin, et al. Analysis of four-year energy consumption data of a nearly zero energy office building in four years[J]. Building Science, 2021,37(4):1-8.
- [12] 李文涛,刘衍,杨柳,等. 近零能耗居住建筑供冷年耗冷量指标分析研究[J]. 暖通空调, 2022,52(8):120-126.  
LI Wentao, LIU Yan, YANG Liu, et al. Analysis and study of annual cooling consumption indicator of nearly zero energy residential buildings [J]. Building Science, 2022,52(8):120-126.
- [13] 冯国会,李奇岩,王刚,等. 基于 DeST 仿真和 GS-SVR 算法对严寒气候区近零能耗公共建筑逐时负荷预测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022,38(1): 149-155.  
FENG Guohui, LI Qiyang, WANG Gang, et al. Hourly load forecast of nZEB in severe cold area based on

- DeST simulation and GS-SVR algorithm[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2022,38(1):149-155.
- [14] 李晓萍,李宝伟,王国慧,等. 基于多目标优化的严寒地区近零能耗建筑适用技术研究[J]. 建筑节能,2020,48(11):63-66,134.
- LI Xiaoping, LI Baowei, WANG Guohui, et al. Application technologies of nearly zero energy building in severe cold zone based on multi-objective optimization method [J]. Building Energy Efficiency, 2020,48(11): 63-66, 134.
- [15] 刘少亮,强万明,张振,等. 严寒地区近零能耗建筑非透明围护结构经济敏感度分析[J]. 建筑技术,2020,51(11):1385-1388.
- LIU Shaoliang, QIANG Wanming, ZHANG Zhen, et al. Economic sensitivity analysis of non-transparent enclosure structure of nearly zero energy buildings in severe cold zones[J]. Architecture Technology, 2020, 51(11):1385-1388.
- [16] 余镇雨,路菲,邹瑜,等. 基于模拟的多目标优化方法在近零能耗建筑性能优化设计中的应用[J]. 建筑科学, 2019,35(10):8-15.
- YU Zhenyu, LU Fei, ZOU Yu, et al. A simulation-based multi-objective optimization approach for design of nearly zero energy buildings [J]. Building Science, 2019,35(10):8-15.
- [17] 董晓亚,李德英,王艺霖. 近零能耗办公建筑外墙保温材料厚度优化研究[J]. 新型建筑材料,2020,47(7): 143-146,151.
- DONG Xiaoya, LI Deying, WANG Yilin. Research on thickness optimization of exterior wall insulation material of near-zero energy office building[J]. New Building Materials, 2020,47(7):143-146,151.
- [18] 张文,聂金哲. 新风热回收系统在我国不同气候区典型建筑中的适用性研究[J]. 建筑科学,2022,38(8): 194-200.
- ZHANG Wen, NIE Jinzhe. Study on applicability of heat recovery ventilation system in typical buildings in different climate regions of China [J]. Building Science, 2022,38(8):194-200.
- [19] 房涛,李洁,王崇杰,等. 太阳辐射得热影响下的近零能耗住宅体形设计研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(2):287-295.
- FANG Tao, LI Jie, WANG Chongjie, et al. Form design of nearly zero energy residence due to solar heat gains [J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2020,52(2):287-295.
- [20] 林正豪,宋晔皓. 近零能耗轻质装配式建筑的板缝气密性优化设计研究[J]. 建筑节能,2022,50(6):52-58,78.
- LIN Zhenhao, SONG Yeahao. Optimized design of panel joints air-tightness for nearly zero energy lightweight prefabricated building[J]. Building Energy Efficiency, 2022,50(6):52-58,78.
- [21] 孙大明,周海珠,田慧峰. 建筑热桥研究现状与展望[J]. 建筑科学,2010,26(2):128-134.
- SUN Daming, ZHOU Haizhu, TIAN Huifeng. Research status and prospect of building thermal bridge [J]. Building Science, 2010,26(2):128-134.
- [22] 彭莉,潘玉亮,沈宏伟等. 超低能耗居住建筑热桥数值模拟研究[J]. 建筑科学,2022,38(6):197-205.
- PENG Li, PAN Yuliang, SHEN Hongwei, et al. Numerical simulation of thermal bridge for ultra low energy residential buildings[J]. Building Science, 2022,38(6):197-205.
- [23] 刘少亮. 线性热桥对超低能耗建筑 and 传统节能建筑的热工影响对比分析[J]. 建筑技术,2021,52(4): 396-399.
- LIU Shaoliang. Thermal effect analysis of linear thermal bridge on ultra-low energy consumption building and traditional energy saving building [J]. Architecture Technology, 2021,52(4):396-399.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑物气密性测定方法 风扇压力法:GB/T 34010-2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017:7-12.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the people's Republic of China. Standard for determination of air permeability of buildings—Fan pressurization method: GB/T 34010-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017:7-12.

(编辑 桂智刚)