

寒冷地区村镇住宅太阳能供热采暖系统应用分析

Application Analysis of Solar Energy Heating System in Cold Regions about Rural Residential Buildings

刘迪 杨晓华 吴青 单文豪

Di Liu Xiaohua Yang Qing Wu Wenhao Shan

山东电力工程咨询院有限公司 中国·山东 济南 250013

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp., Ltd., Jinan, Shandong, 250013, China

摘要: 论文以中国保定市唐县某农户为例, 基于动态热负荷系数法, 分析了建筑热负荷和太阳能保证率, 在此基础上设计太阳能供热采暖系统, 并对比太阳能集热器耦合不同辅助热源时的经济性和节能性, 为太阳能供热采暖系统在寒冷地区村镇建筑的推广提供了指导性建议。

Abstract: Taking a farmer in Tang County, Baoding City, China as an example, this paper analyzes the building heat load and solar energy assurance rate based on the dynamic heat load coefficient method. Based on this calculation result, this paper designs a solar heating system, and compares the economy and energy saving of the solar collector coupling different auxiliary heat sources. It provides suggestions for the popularization of solar heating system in rural buildings in cold regions.

关键词: 太阳能供热采暖系统; 动态热负荷; 经济节能; 新农村建设

Keywords: solar heating system; dynamic heat load; economy and energy saving; new rural construction

DOI: 10.12346/etr.v4i12.7408

1 引言

长久以来, 中国北方村镇住宅采暖方式以燃煤采暖炉为主, 耗煤量大, 燃煤效率低, 不仅室内舒适性难以保障, 造成热量浪费, 煤炭不充分燃烧产生的 SO_2 、 CO 等物质也会加重环境污染。村镇住宅多为独栋建筑, 建筑之间间隔较大, 且北方冬季寒冷干燥, 以晴朗天气居多, 整体太阳能资源水平高于南方, 非常适合太阳能的利用。

2 理论模型

2.1 建筑采暖负荷

在实际工程中, 建筑热负荷受太阳辐射强度影响呈规律性改变, 在以往的太阳能供热采暖系统设计研究中, 通常采用热指标法对采暖负荷估算, 难以结合当地环境和建筑类型匹配设计方案。论文采用动态热负荷系数法, 在考虑太阳辐射扰动和墙体蓄热等因素下, 计算建筑采暖负荷^[1]。

动态热负荷系数法核心为 Z 传递系数法, τ 时刻采暖

建筑围护结构热负荷由以下简化公式计算:

$$Q_{H,\tau} = V_0 q_{\tau} + V_1 q_{\tau-1} - W_1 Q_{H,\tau-1} \quad (1)$$

式中, $Q_{H,\tau}$ 、 $Q_{H,\tau-1}$ —— τ 时刻和 $\tau-1$ 时刻的热负荷, W/m^2 ;

q_{τ} 、 $q_{\tau-1}$ —— τ 时刻和 $\tau-1$ 时刻的失热量, W/m^2 ;

V_0 、 V_1 、 W_1 ——建筑 Z 传递函数诸系数。

其中, 围护结构中墙体部分的逐时失热量 $q_{\tau,q}$ 由式 (2) 得:

$$q_{\tau,q} = \sum_{i=0}^6 b_i t_{z,\tau-i} + \sum_{i=1}^6 d_i q_{\tau-i,q} - t_n \sum c_i \quad (2)$$

式中, b_i 、 d_i 、 $\sum c_i$ ——建筑围护结构的 Z 传递系数, 与围护结构形式有关, 可通过查阅文献获取;

$t_{z,\tau-i}$ —— $\tau-i$ 时刻墙体外表面室外综合温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_n ——建筑室内设计温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

对于玻璃窗等透光围护结构, 太阳辐射作用在外表面时要经过反射、透射和吸收过程, 与墙体的热作用过程有明显

【作者简介】刘迪 (1996-), 女, 中国山东临沂人, 硕士, 初级工程师, 从事暖通空调研究。

不同,玻璃窗的逐时失热量 $q_{r,c}$ 由式(3)可得:

$$q_{r,c} = C_s D_s + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{1}{\alpha_w}} (t_w - t_n) \quad (3)$$

式中, C_s ——玻璃窗遮挡系数;
 t_w ——室外空气温度,℃;
 α_n 、 α_w ——玻璃内外表面放热系数,W/(m²·K);
 D_s ——日射的热因素,W/m²。

其中,受太阳辐射在玻璃窗表面复杂热作用过程的影响,单层窗和双层窗的日射得热因素计算式有所区别,可分别由式(4)和式(5)计算得:

$$D_{s,单} = \tau_{Di} I_{DV} + \tau_d I_d + \frac{1}{\alpha_w R} (\alpha_{Di} I_{DV} + \alpha_d I_d) \quad (4)$$

$$D_{s,双} = \tau_{Di,1-2} I_{DV} + \tau_d I_d + \frac{1}{\alpha_w R} (\alpha_{Di,1-2}^{(1)} I_{DV} + \alpha_{d,1-2}^{(1)} I_d) + (1 - \frac{1}{\alpha_w R}) (\alpha_{Di,1-2}^{(2)} I_{DV} + \alpha_d^{(2)} I_d) \quad (5)$$

式中, τ_{Di} ——入射角为*i*时的玻璃直射透过率;
 $\tau_{Di,1-2}$ ——透过双层玻璃的直射透过率;
 τ_d ——玻璃的散射透过率,实际应用计算中,

常直接采用 $\tau_d = \tau_{Di(i=45^\circ)}$;

α_{Di} ——入射角为*i*时的玻璃直射吸收率;
 $\alpha_{Di,1-2}^{(1)}$ ——外层玻璃1的吸收率, ρ_{Di} 为直射反

射率;

$\alpha_{Di,1-2}^{(2)}$ ——内层玻璃2的吸收率, $\alpha_{Di,1-2}^{(2)} = \frac{\tau_{Di}}{1 - \rho_{Di}^2}$;

α_d ——玻璃的散射吸收率, $\alpha_d = \alpha_{Di(i=45^\circ)}$;

I_{DV} ——太阳辐射直射强度在玻璃表面法线方向的分量,W/m²;

I_d ——玻璃表面接收的太阳辐射散射强度,W/m²;

α_w ——玻璃外表面放热系数,W/(m²·K);

R ——玻璃传热过程总热阻,其中双层玻璃要考虑空气层热阻。

根据上述逐时热负荷计算公式可得建筑整个采暖季的耗热量 Q_c ,如式(6)所示:

$$Q_c = \sum_{i=1}^M \sum_{\tau=1}^N A_i Q_{H,\tau} \times 10^{-3} \quad (6)$$

式中, Q_c ——建筑采暖季耗热量,kWh;

A_i ——建筑第*i*个围护结构的面积,m²;

M ——围护结构的个数;

N ——采暖小时数。

2.2 生活热水负荷

论文主要针对村镇住宅采暖期进行热负荷研究,农村中热水负荷主要集中于洗澡和厨房用水,详细负荷难以计算,因此采用指标法进行估算,按每人每天50℃生活热水用量60L计,热水负荷按式(7)可得:

$$Q_w = \frac{m_0 c \rho V_r D (t_r - t_l)}{3600} \quad (7)$$

式中, Q_w ——生活热水设计小时耗热量,kWh;

m_0 ——平均用水人数,每天平均用水人数按4人考虑;

c ——水的比热, $c = 4.187$ kJ/(kg·℃);

ρ ——热水密度,1kg/L;

V_r ——每人每天热水用量指标,60L/(人·d);

D ——采暖期天数;

t_r ——生活热水供应温度,取50℃;

t_l ——冷水温度,取10℃。

2.3 太阳能保证率分析

太阳能保证率是评价太阳能系统热性能的重要指标之一,其物理意义为太阳能集热系统中来自太阳辐射的有效地热与建筑所需总热负荷之比,其中建筑总负荷应包括采暖负荷与生活热水负荷,计算过程如式(8)所示:

$$f = \frac{\sum_{\tau=1}^N I_{R,\tau} F \eta_1 (1 - \eta_2) \times 10^{-3}}{Q_c + Q_w} \quad (8)$$

式中, f ——太阳能保证率;

$I_{R,\tau}$ ——入射采光面上 τ 时刻太阳总辐射强度,W/m²;

N ——整个采暖季小时数;

F ——集热器的面积,m²;

η_1 ——集热器全日集热效率,与产品性能相关,参考相关产品技术手册,可取0.62;

η_2 ——管路及储热水箱热损失率,取值范围0.1~0.2,根据经验可取0.15。

3 案例分析

3.1 案例概况

中国河北保定地处寒冷地区,年平均温度为12.9℃,太阳能总辐射年总量属于三类区域,太阳能总辐射年总量为4981~5966MJ/(m²·a),冬季日照百分率为56%,年平均日照小时数为2200~3000h。因此,论文以河北保定唐县某农村为例,将上节理论模型带入分析,评估太阳能供热采暖系统在该地区的可行性。该地区主要农户的户型尺寸为16m×7m×3.5m,墙体为240mm框架剪力墙结构,屋顶为150mm轻钢顶板坡结构,分别采用80mm和150mm聚苯乙烯泡沫空腔板进行保温,门窗采用双层玻璃,尺寸分别为1.2m×1.6m、1.0m×1.2m、0.8m×2.0m。根据农户围护结构组成特点,可以获取上节逐时热负荷计算式中具体的Z传递系数值^[2]。

3.2 负荷分析

本案例中,保定唐县位于寒冷地区,设采暖季起始时间为11月15日,结束时间为次年3月15日,利用

Meteonorm 气象资源库可获取唐县地区的气象参数, 得到采暖季期间入射采光面逐时太阳总辐射强度和室外温度, 由此可计算出建筑热负荷。在确定集热面积时, 因村镇建筑房顶空间有限, 且集热器面积与初投资呈正比, 因此在此供热采暖系统中, 选择两组面积一定的集成式集热器, 单组集热器面积取 4.68m^2 。经计算得此建筑采暖季期间逐日热负荷以及太阳能集热器的日逐集热量, 如图 1 所示。

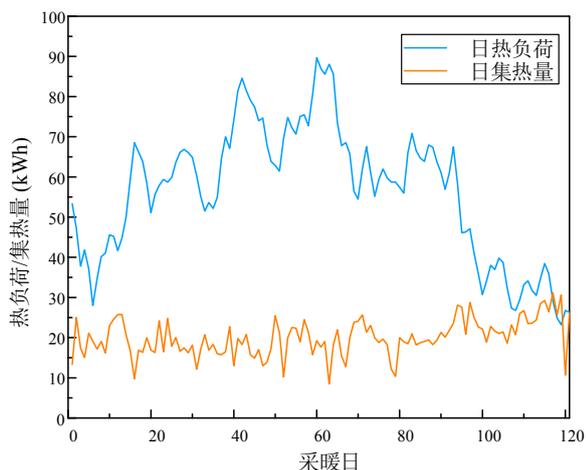


图 1 采暖季逐日热负荷与逐日集热量

由图 1 可得, 此建筑逐日热负荷变化较大, 在采暖季第 60 天有最大日热负荷, 且最大逐时热负荷也在此日, 其值为 5.66kW 。集热器日的热量变化较小, 大部分都小于热负荷, 因此太阳能供热采暖系统若想保证村镇建筑内部舒适性就必须采用辅助热源。在采暖季后期室外温度较高时, 建筑热负荷呈减小趋势, 只用太阳能集热器也能满足采暖和生活热水需求, 此时便无需再使用辅助热源。另外, 通过对比室外温度变化曲线可得, 最低室外温度在最大逐时热负荷处于的前一时刻, 说明相较于室外环境温度, 建筑负荷受墙体蓄热等多种因素影响从而导致了延迟变化^[3]。

根据式 (8), 对逐日热负荷值求和, 得到此建筑在整个采暖季的热负荷为 $6821.96\text{kW} \cdot \text{h}$, 并计算得到太阳能集热器总得热量为 $2414.30\text{kW} \cdot \text{h}$, 最终可得此系统在整个采暖季的太阳能保证率为 35.39% 。

4 效益分析

为保障建筑舒适性, 太阳能供热采暖系统必须耦合辅助热源。针对农村太阳能采暖, 当前市场最常用的辅助热源主要有生物质炉、空气源热泵、燃气锅炉和电辅热, 考虑到用户的特殊性, 对太阳能供热采暖系统进行经济性分析具有重要意义。根据上节中整个采暖季的热负荷与集热器的热量的分析结果, 计算整个建筑太阳能供热采暖系统的投资回报, 见表 1。

从系统投资结果对比中可以看出, 四种设计方案中太阳能 + 生物质炉耦合系统最有优势, 初投资和年运行费用都

较低, 且利用生物质作为燃料, 因地制宜, 极大减小了农村环境负担。以空气源热泵作为辅助热源时, 年运行费用最少, 且运行过程安全卫生, 但热泵在制热时 COP 值受环境影响大, 在极端环境下系统能效偏低^[4]。燃气炉的燃料主要是天然气, 供暖效果稳定, 但大部分农村地区无法实现天然气集中供应, 且系统运行费用较高, 难以广泛推广。太阳能 + 电辅热系统最为简单, 尽管初投资最低, 但农村建筑面积大, 恶劣条件下不仅耗电量大, 导致运行费用非常高, 且采暖效果也难以保证。

表 1 太阳能供热采暖系统投资和效益

方案	太阳能 + 生物质炉	太阳能 + 空气源热泵	太阳能 + 燃气炉	太阳能 + 电辅热
年供热量 / $\text{kW} \cdot \text{h}$	6821.96	6821.96	6821.96	6821.96
太阳能承担热负荷 / $\text{kW} \cdot \text{h}$	2414.30	2414.30	2414.30	2414.30
太阳能投资 / 元	8600	8600	8600	8600
辅助热源投资 / 元	3000	5000	3000	1000
其他投资 / 元	6900	6900	6900	6900
总初投资 / 元	18500	20500	18500	16500
年运行费用 / 元	1287.52	1256.27	1452.03	2512.54
碳排放量 / ($\text{kg}/\text{年}$)	0	2062.04	989.15	4124.09
经济效益 / 元	705.1	687.99	795.2	1375.98

注: ①生物质炉供热效率取 0.85, 生物质热值取 $14.5\text{MJ}/\text{kg}$, 生物质燃料市场平均价格为 $1\text{元}/\text{kg}$ 。

②空气源热泵冬季制热 COP 取 2, 取河北地区电价 $0.57\text{元}/\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

③假设燃气炉供热效率为 0.9, 燃气热值为 $34\text{MJ}/\text{m}^3$, 燃气价格 + 为 $2.8\text{元}/\text{m}^3$ 。

④根据相关文献, 河北地区电网 CO_2 排放因子为 $0.94\text{kg}/\text{kW} \cdot \text{h}$, 《IPCC 国家温室气体清单编制指南 (2006)》中给出天然气的碳排放因子为 $56.1\text{kg}/\text{GJ}$ 。

当不采用太阳能集热器, 完全由生物质炉、空气源热泵、燃气炉和电采暖设备承担建筑热负荷时, 年运行费用会大幅度提升, 与单一采暖系统相比, 太阳能 + 辅助热源所节省的运行费用即为该系统的经济效益。前三种方案一年的经济效益在 700 元左右, 电辅热最高, 可达 1375 元, 但系统自身运行费用太高, 不利于推广, 因此不适合在农村使用。

为助力实现双碳目标, 在新农村建设过程中采暖系统设计时除了考虑经济投资外, 还需要进行环境效益对比。以年 CO_2 排放量来对比不同辅助热源的环境效益, 其中生物质炉燃料来源为木柴、秸秆等, 其燃烧释放的 CO_2 量与生长过程中吸收的 CO_2 大致相等, 因此可以认为生物质炉在运行时是零碳排放。空气源热泵和电辅热的碳排放量都比较高, 相比之下燃气炉碳排放量较低, 约为空气源热泵的 $1/2$ 。

综合以上对比结果,最适合在寒冷地区村镇建筑中推广的采暖方案为太阳能+生物质炉耦合系统,此系统具有明显的经济优势和节能效益,同时因地制宜合理回收秸秆木柴等,减轻环境负担,具有重要的现实意义。

5 结语

太阳能作为一种资源丰富的清洁能源,考虑到太阳能取暖存在“间歇性”问题,将太阳能集热器与其他辅助热源联合运行,确保用户冬季采暖需求。太阳能供热采暖系统运行效果受当地太阳辐射强度影响大,太阳能资源越丰富太阳能保证率越高,系统越经济节能。对于太阳辐射强度三四类地区,则要求建筑围护结构具备保温性,才能保障实际工程可行性。太阳能供热采暖系统具有很大的经济效益和环境效

益,能实现农村用能结构的调整,若能获取政府的大力支持,不仅可以加快新农村建设,对中国经济、环境和能源建设也将产生积极推动作用。

参考文献

- [1] 敖永安.太阳能供暖系统在中国的发展分析[J].建筑技术,2015,46(11):966-970.
- [2] 朱敦智,刘君,芦潮.太阳能采暖技术在新农村建设中应用[J].农业工程学报,2006(6):34-36.
- [3] 李楠.北京某农村住宅空气源热泵辅助太阳能供暖系统的运行性能[J].暖通空调,2017,47(4):136-140.
- [4] 杨晓华.太阳能采暖房间动态热负荷计算方法研究[D].西安:西安建筑科技大学,2010.