

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-839-07

某民用建筑可再生能源热水系统设计分析

甄璐莹 高朋 魏俊辉 刘启明 褚赛

(北京市勘察设计研究院有限公司 北京 100038)

【摘要】 近年来,在“碳达峰、碳中和”的大背景下,国家及地方政府颁布了一系列节能降耗、降碳减排的政策,推动能源绿色高效智慧转型,促进可再生能源高质量发展。太阳能、热泵等可再生能源作为生活热水系统的热源具有清洁环保、节能低碳、可持续获取的优势,近年来在民用建筑的生活热水系统中得到了广泛的应用。以宜兴市某住宅建筑的集中式太阳能+空气源热泵热水系统为例,制定了系统运行控制策略,详细介绍了系统精细化设计思路及过程。对比传统燃气、电力能源,寿命期内能源费用比燃气节省 55.33 万元,比电力节省 77.33 万元,节能及环境效益明显,减少了烟尘、CO₂、SO₂及 NO_x的排放量,为可再生能源热水系统的深化设计及应用发展提供参考。

【关键词】 集中式太阳能热水;空气源热泵;运行策略;经济环保效益

中图分类号 TK11 文献标志码 A

Design of Renewable Energy Hot Water System for a Civil Building

Zhen Luying Gao Peng Wei Junhui Liu Qiming Chu Sai

(Beijing Survey and Design Research Institute Co., Ltd, Beijing, 100038)

【Abstract】 In recent years, in the context of "reaching the peak of carbon and carbon neutrality", national and local governments at all levels have promulgated a series of policies on energy conservation, carbon reduction and emission reduction, promoting the green, efficient and intelligent transformation of energy, and promoting the high-quality development of renewable energy. As the heat source of domestic hot water system, renewable energy such as solar energy and heat pump has the advantages of clean environmental protection, energy saving, low carbon and sustainable access, and has been widely used in domestic hot water systems of civil buildings in recent years. Taking the centralized solar energy + air source heat pump hot water system of a residential building in Yixing City as an example, this paper formulated the system operation control strategy, introduced the system fine design ideas and processes in detail. Compared with traditional gas and electric energy, the energy cost during the life cycle is 55.33 yuan less than gas and 77.33 yuan less than electricity, and the energy saving and environmental benefits are obvious, reducing the emissions of soot, CO₂, SO₂ and NO_x. This article providing a reference for the further design and application development of renewable energy hot water system.

【Keywords】 Centralized solar water heating; Air source heat pump; Operation strategy; Economic and environmental benefit

0 引言

太阳能资源是一种极为丰富的可再生能源,我国的年太阳能辐照总量大约在 3300MJ/m²—

8400MJ/m²[1]。太阳能资源利用非常广泛,主要包括三种形式,即光—热转化利用、光—化学转化利用、光—电转化利用三种形式[2]。太阳能光热利用,

即把太阳能通过一定设备转化成热能进行储存并应用,常见的有太阳能热水器、太阳能灶等。在太阳能资源利用中,太阳能热水器是应用最为广泛的一种,其主要由集热器、集热水箱、水泵以及各连接管道组成^[1]。太阳能资源在时间和空间上分布不均匀,系统稳定性容易受太阳能辐照量的影响,在太阳能辐射量不足的情况下,无法有效保证供暖和热水供应的连续性,为提高能源利用率,采用太阳能与热泵耦合的形式,提高热水系统的安全性和稳定性。

满祥^[4]分析了被动式建筑热水系统,重点分析空气源热泵—太阳能耦合技术设计及施工,解决了单一太阳能热水系统供热稳定性差的问题。诸葛梦晴^[5]以某高校太阳能—空气源热泵热水系统为例,介绍了该项目中太阳能—空气源热泵热水系统在实际运行中出现的问题及其解决方案。周津津^[6]以天津某酒店项目为例,从热源选择和系统构成、工作原理、设备选型等方面介绍了太阳能+空气源热泵+电辅助加热系统的设计。林小辉^[7]以高校宿舍太阳能—空气源热泵复合热水系统为例,阐述了系统的设计原理及设备选型,并结合实际运行工况下的数据,计算到系统在不同季节的太阳能保证率、热泵能效比 COP 值,表明系统具有极大的节能性。马一程^[8]为提高太阳能—空气源热泵热水系统的经济效益与减排效果,提出加入夜间蓄热水箱和热泵机组缓冲水箱的两种多水箱太阳能—空气源热泵热水系统,发现三水箱比传统单水箱全年节省电费 22.35%,太阳能保证率提高 33.32%,平均系统 COP 提高 45.70%。贺伟^[9]对太阳能—空气源热泵负荷能源系统在广东地区夏季典型工况下的三种运行模式:空气能热泵系统、太阳能集热系统以及太阳能—空气源复合能源利用系统的性能进行研究,对其制热量、功率和试验时间进行对比。国内对太阳能—空气源热泵热水系统研究较广泛,并在实际应用中逐渐推广。

本文以宜兴市某住宅集中式太阳能热水系统为例,制定了系统运行控制策略,详细介绍了系统精细化设计思路及过程,为可再生能源热水系统的深化设计及应用发展提供参考。

1 系统组成及运行

本项目位于宜兴市,建筑主要功能为住宅。建设集中式热水系统满足住宅男女更衣室生活热水需求:采用太阳能作为主要的热源,空气源热泵来补足太阳能集热板的供热量,并设置电加热器进行热水二级辅助加热,保证热水供应,形成太阳能+空气源热泵+电辅助加热的集中热水系统。

此系统包括太阳能集热子系统和热泵子系统,两者结合可充分发挥系统优势。在天气晴朗、光照充足时,可利用太阳能对热水加热,运行成本低,无污染;在雨雪、阴天等光照不足时,可利用热泵对热水进行加热,弥补了天气因素对系统的限制,实现了全天候为用户提供热水。安装合理的系统控制策略,既能充分利用太阳能又可弥补天气因素的限制,节约能源消耗,降低系统运行成本,实现节能减排。

太阳能集热器、空气源热泵机组、水箱、水泵、软化水装置、电加热器等设备布置于二楼屋顶。

1.1 系统组成

如图 1 所示,系统采用强制循环、间接换热的方式,由平板式太阳能集热器、储热水罐、供热水罐、空气源热泵机组、循环水泵、软水处理装置、管道式电加热器等主要设备,阀门附件、循环管道及控制系统组成,储热水箱及供热水箱均为承压式水箱,内设换热盘管,间接换热。

(1) 本系统生活热水采用太阳能作为主要供热热源,当太阳能受天气或季节影响而供热不足时则采用空气源热泵补充供热。系统配置有 120m²的集热器以及 2 台 37.5kW 的空气源热泵机组,热泵机组总输出热量 75kW。

(2) 系统配置 1 个有效容积为 3.5m³ 的太阳能储热水箱和 1 个有效容积为 4.2m³ 的热泵储热水箱;太阳能储热水箱与热泵加热水箱采用管道串联安装,冷水先进入太阳能储热水箱,优先使用平板式太阳能集热器加热;热量不足时,由空气源热泵机组补充加热。系统采用水箱串联的安装方式,既可将太阳能效率最大化,又可保证系统 24h 有热水供应。极端天气空气源热泵+太阳能都不能满足使用要求时,启动电辅助。

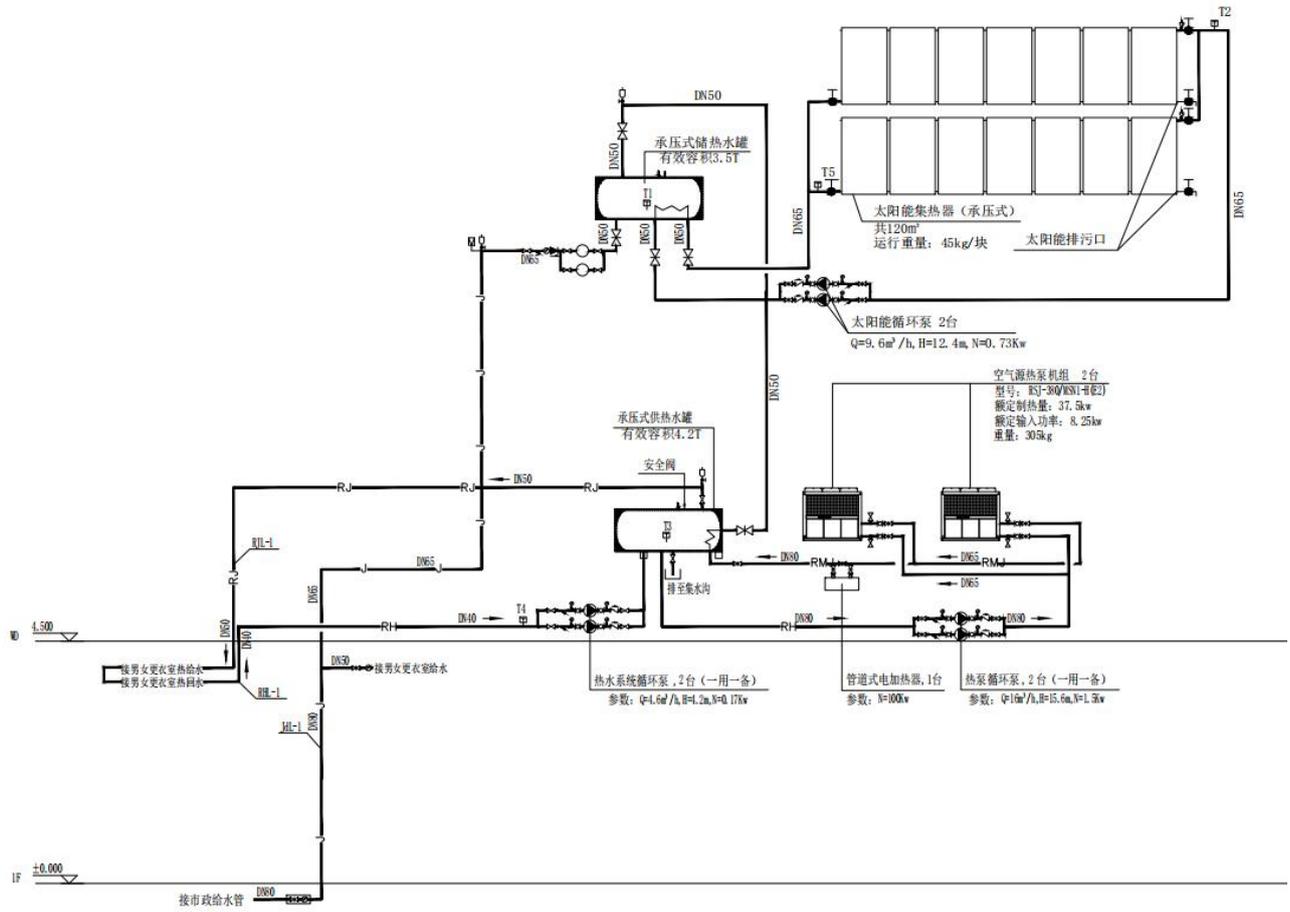


图 1 系统运行原理图

Fig.1 Schematic diagram of system operation

1.2 运行工况

太阳能—空气源热泵供热系统主要有以下三种运行工况。

(1) 太阳能集热系统直接加热生活热水

当阳光充足, 天气比较好的时候, 此时仅利用太阳能集热系统即可完成对热水的加热, 系统运行能耗最少。此时, 水箱热能完全由集热器提供, 系统集热循环由集热器出口温度和水箱热水温度的温差决定, 当温差大于启动温差时启动集热循环泵, 将集热器中的热量交换入集热水箱, 直到温差小于停止温差或者集热水箱温度达到水箱上限温度时, 停止集热循环。

(2) 空气源热泵系统直接加热生活热水

当天气处于连续阴雨天气时, 太阳能集热系统无法供热, 用户所需的热量均由热泵提供, 此时系统工作于热泵机组单独制热模式, 该模式下

控制目标是热泵, 打开热泵后热泵独立工作, 若热泵无法满足供能需求, 开启电辅热, 该工况耗能最多。

(3) 太阳能集热系统和空气源热泵系统联合加热生活热水

如果阳光辐射强度处于中等, 仅利用太阳能不能加热足够的热水供用户使用时, 太阳能集热器和空气源热泵将共同制热, 系统进入联合制热模式。

(4) 太阳能集热器+空气源热泵系统+电辅热联合加热生活热水

当日照条件不利, 且受极端天气影响, 太阳能和空气源热泵联合运行仍不能满足热水供应需求时, 应开启电加热功能, 保证满足热水需求。

1.3 运行策略

通过以下控制方式, 实现系统运行策略, 控制系统原理图如图 2 所示。

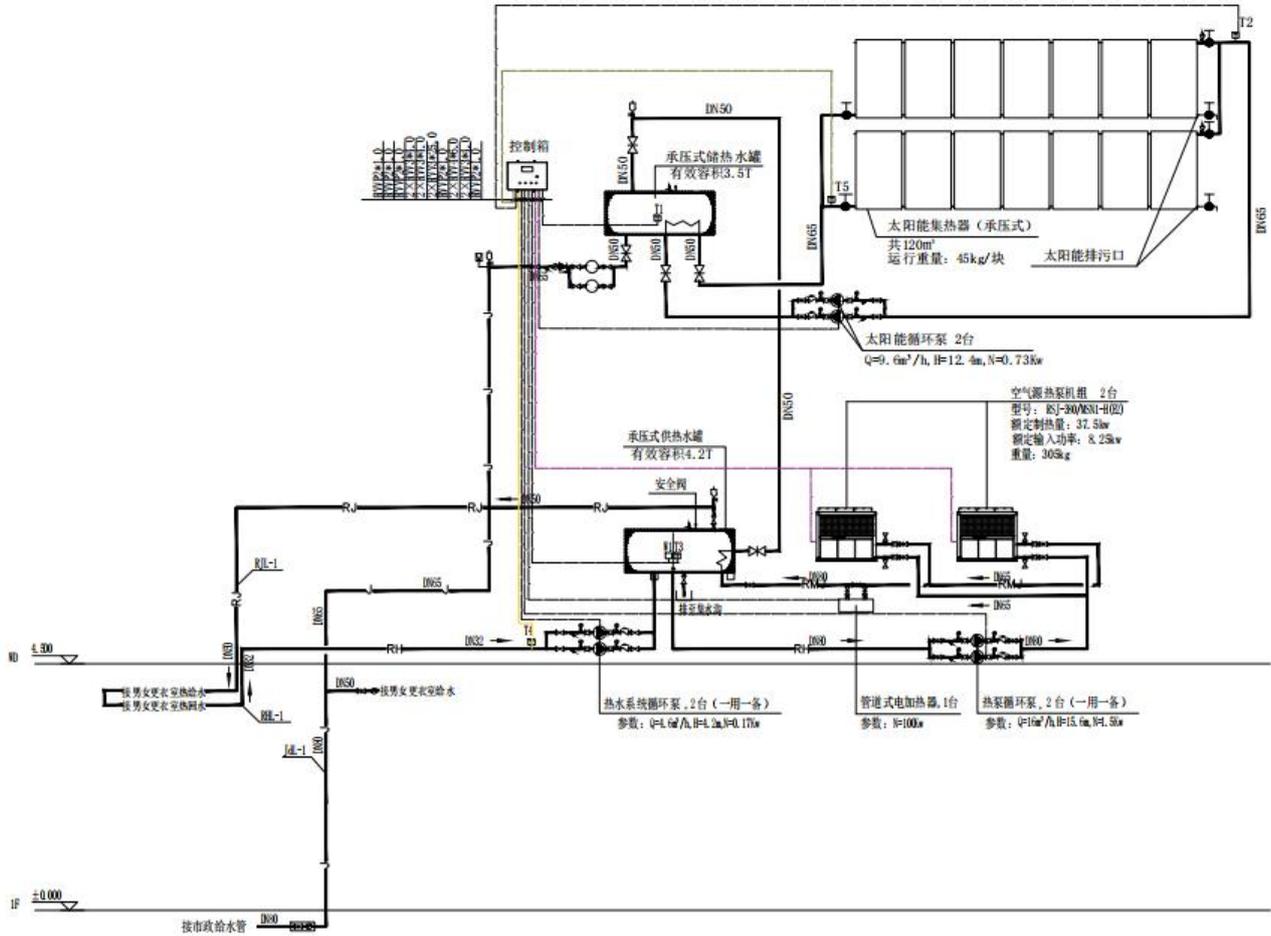


图 2 控制系统原理图

Fig.2 Schematic diagram of the control system

(1) 集热温差循环

当有太阳辐照时，由太阳能集热器组成的集热器阵列吸收太阳的能量，逐渐加热太阳能集热器中的工质，集热器顶部温度 T_2 迅速的升高，当集热器顶部温度 T_2 与储热水箱水温 T_1 的差值大于等于控制程序的设定值（一般设置为 7°C ， 5°C — 10°C 可调）时，控制系统自动开启太阳能集热循环泵，将太阳能集热器阵列所吸收的热量存储到储热水箱中；而当 T_2 与 T_1 的差值小于控制程序的设定值时（一般设置为 3°C ， 2°C — 5°C 可调），控制系统会自动关闭太阳能集热循环泵，停止集热循环；由于循环水泵均停止工作，太阳能集热器中的工质在太阳的辐照下温度再次很快升高，到满足控制系统工作条件时开始新一轮循环，直到储热水箱内的水温 T_1 达到 60°C （可调）为止。

(2) 智能辅助加热

冬季室外温度大于 -5°C 时，开启空气源热泵，

当室外温度小于 -5°C 时，开启管道式电加热器。

空气源热泵机组辅助加热：当供热水箱水温 $T_3 \leq 50^\circ\text{C}$ （可调）时，系统会自动开启热泵机组，热泵循环泵联动开启，对供热水箱内的水进行辅助加热，当 $T_3 \geq 55^\circ\text{C}$ （可调）时，辅助热源系统关闭。

管道式电加热器辅助加热：当供热水箱温度 $T_3 \leq 50^\circ\text{C}$ （可调）时，启动电辅助，当供热水箱温度 $T_3 \geq 55^\circ\text{C}$ （可调）时，关闭电辅助加热。

(3) 即开即热

当一段时间无人用水时，生活热水供水管路的水温会逐渐降低，洗浴时需耗费时间将供水管路里的冷水排尽才能放出热水。为规避此问题，增设一根生活热水回水管，同时在设定时间段内实时检测生活热水回水管的水温 T_4 ，当 T_4 低于 48°C （可调）时，打开热水回水泵，将生活热水供水管路里的冷水带回供热水箱内，以达到即开即热的目的；当 T_4 达到设定值 52°C （可调），热水回水泵停止。

(4) 过热保护

储热水箱过热:当储热水箱温度过高即 T_1 达到 80°C (可调) 时,太阳能集热循环泵停止动作,停止太阳能集热器与储热水箱间的换热,当 T_1 温度降低到 70°C (可调) 时再恢复初始状态 (开启太阳能集热循环泵)。

(5) 防冻保护

采用低温微循环和电伴热双重防护,当检测集热器温度 $T_3 \leq 5^\circ\text{C}$ (可调) 时,启动太阳能循环泵,同时启动电伴热,当 $T_3 \geq 8^\circ\text{C}$ 时,太阳能循环泵停止运行,同时关闭电伴热。

(6) 漏电、雷击保护

控制系统配置有漏电保护空气开关,在系统出现漏电情况时动作,可有效的防止漏电造成的危害。由于太阳能集热系统整体为钢结构,是良好的导体,将钢架与建筑避雷系统相连接,以最大限度的疏散雷击电流。太阳能集热系统的防雷采用等电位法,即:支架焊接长度不应小于圆钢直径的6倍,用不小于 $\phi 12\text{mm}$ 的镀锌圆钢作防雷引下线与建筑避雷系统做可靠连接。

(7) 控制系统

太阳能控制器采用数字显示全自动智能化控制,不仅需满足上述所有功能需求,同时还应具有手动和自动功能。

2 设计分析

2.1 设计小时耗热量

根据《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)^[10],本项目住宅全日集中热水供应系统的设计小时耗热量计算公式为式(1)。

$$Q_h = K_h \frac{mq_r C(t_r - t_l) \rho_r}{T} C_r \quad (1)$$

式中: Q_h 为设计小时耗热量, kJ/h ; K_h 为小时变化系数,根据用水定额高低及使用人数多少采用内插法求得; m 为用水计算单位数,人; q_r 为热水用水定额, $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$; C 为水的比热, $\text{kJ}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; t_r 为热水温度, $^\circ\text{C}$; t_l 为冷水温度, $^\circ\text{C}$; ρ_r 为热水密度, kg/L ; T 为每日使用时间, h ; C_r 为热水供应系统的热损失系数,取 1.10~1.15。

本项目用水计算单位数为 125 人,最高日用水定额为 $40\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$,热水温度 60°C ,冷水温度取地面水温度 10°C 。经计算,设计小时耗热量 Q_h 为

55kW 。

2.2 集热器设计分析

2.2.1 平均日耗热量

根据《建筑给水排水设计标准》(GB 50015-2019)^[10],平均日耗热量计算公式为式(2)。

$$Q_{md} = q_{mr} m b_1 C \rho_r (t_r - t_L^m) \quad (2)$$

式中: Q_{md} 为平均日耗热量, kJ/d ; q_{mr} 为平均日热水用水定额, $\text{L}/(\text{人} \cdot \text{d})$; m 为用水计算单位数,人; b_1 为同日使用率的平均值,按实际使用工况确定; t_L^m 为年平均冷水温度, $^\circ\text{C}$ 。

经计算,本项目平均日耗热量为 1046750kJ/d 。

2.2.2 直接系统集热面积

本项目为间接式太阳能热水系统,需先求得直接式系统集热面积,再由此推导间接式系统集热面积。直接系统集热面积计算公式为式(3)^[10]。

$$A_{jz} = \frac{Q_{md} f}{b_j J_t \eta_j (1 - \eta_1)} \quad (3)$$

式中: A_{jz} 为直接太阳能热水系统集热器总面积, m^2 ; Q_{md} 为平均日耗热量, kJ/d ; f 为太阳能保证率, %; b_j 为集热器面积补偿系数, %; J_t 为集热器总面积的平均日太阳辐照量, $\text{kJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$; η_j 为集热器总面积的年平均集热效率, %; η_1 为集热系统的热损失, %。

本项目集热器拟布于二楼屋顶,南向安装,安装倾角为当地纬度,面积补偿系数取 $b_j=1$;根据集热器检测报告,取集热器总面积的年平均集热效率 $\eta_j=50\%$;热损失取 $\eta_1=20\%$ 。经计算,直接系统集热器总面积为 103.74m^2 。

2.2.3 间接系统集热面积

间接系统集热器总面积计算公式为式(4)^[10]。

$$A_{jj} = A_{jz} \left(1 + \frac{U_L A_{jz}}{K F_{jr}} \right) \quad (4)$$

式中: A_{jj} 为间接太阳能热水系统集热器总面积, m^2 ; U_L 为集热器热损失系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})$; K 为水加热传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})$; F_{jr} 为水加热器加热面积, m^2 。

根据集热器检测报告,取集热器热损失系数 $U_L=5.1\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})$;本项目水箱内盘管传热系数 $K=1200\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h})$;根据热媒及被加热水温度并考虑一定的污垢热阻,算得 $F_{jr}=4\text{m}^2$ 。经计算,此间接系统集热器总面积为 115.17m^2 。

2.3 空气源热泵

采用空气源热泵作为辅助热源,由以上计算设计小时耗热量为 55kW,选取 2 台 37.5kW 的空气源热泵机组,热泵机组总输出热量 75kW。

2.4 承压式水箱

采用双水箱系统,集热水箱用于收集太阳能热量,贮热水箱用于供应热水,均为承压式水箱,水箱间设置联通管,通过市政给水压力将集热水箱中水压至供水水箱。

(1) 集热水箱

其有效容积计算公式如式 (5) 所示。

$$V_{rx} = q_{rjd} A_{jj} \quad (5)$$

式中: V_{rx} 为集热水箱有效容积, L; q_{rjd} 为集热器单位轮廓面积平均日产 60℃ 热水量, L/(m²·d)。

根据集热器检测报告,取集热器单位轮廓面积平均日产 60℃ 热水量 $q_{rjd}=30\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。经计算,有效容积为 3600L。

(2) 供水水箱

贮水容积计算公式为式 (6)。

$$V_s = \frac{1.1T_2 \times m \times q_r \times (t_r - t_l) \times C_r}{1000\Delta t} \quad (6)$$

经计算,有效容积为 4200L。

2.5 集热循环泵

集热循环泵为太阳能集热循环侧水泵,其流量

等同集热系统循环流量,扬程为闭式系统循环水泵扬程,计算公式为式 (7) 式 (8) [11]。

$$q_x = q_{gz} A_{jj} \quad (7)$$

$$H_b = h_{jx} + h_e + h_j + h_f \quad (8)$$

式中: q_x 为集热系统循环流量, L/s; q_{gz} 为单位轮廓面积集热系统对应的工质流量, L/m²·s; H_b 为循环水泵扬程, m; h_{jx} 为集热系统循环流量通过循环管道的沿程与局部阻力损失, m; h_e 为循环流量通过换热器的阻力损失, m; h_j 为循环流量通过集热器的阻力损失, m; h_f 为附加压力损失, 一般取 2~5m。

根据集热器检测报告,取工质流量 $q_{gz}=0.02\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; 计算得集热循环泵流量为 9.5m³/h。对循环管路进行水力计算,得集热循环泵扬程为 10.0m。

2.6 电加热器

$$W = \frac{1.163 \times q V_s \times (t_r - t_l)}{T \times \eta} \quad (9)$$

式中: H 为电加热器效率; T 为加热时间, h。

冷水初始温度 10℃, 热水供应温度 60℃, 水箱体积 4.2m³, 加热时间 2.5h, 加热效率取 95%, 经计算加热功率为 102.83kW, 选取功率为 100kW 的管道式电加热器。

2.7 设备选型表

表 1 设备选型表

Table 1 Equipment selection table

| 名称 | 型号及其规格 | 单位 | 数量 | 备注 |
|----------|--|----|----|------|
| 太阳能平板集热器 | 边框尺寸: 2000mm×1000mm×80mm, 吸热板规格: 1960mm×960mm×0.3mm, 采光面积: 1.88m ² , 吸收率: ≥0.92, 发射率: ≤6% | 块 | 60 | —— |
| 储热水罐 | 承压水罐有效容积: 3.5m ³ (直径 1.4m, 长度 2.73m, 高度 1.78m), 设计压力 1.0MPa, 材质: 碳钢罐体, 内衬 2mm 食品级不锈钢, 铜管束盘管换热面积 4m ² | 个 | 1 | —— |
| 供水水罐 | 承压水罐有效容积: 4.2m ³ (直径 1.6m, 长度 2.58m, 高度 2.05m), 设计压力 1.0MPa, 材质: 碳钢罐体, 内衬 2mm 食品级不锈钢, 铜管束盘管换热面积 8m ² | 个 | 1 | —— |
| 空气源热泵机组 | 制热量: 37.5kW, 功率: 8.25kW | 个 | 2 | —— |
| 太阳能循环泵 | 流量: $Q=9.6\text{m}^3/\text{h}$, 扬程: $H=12.4\text{m}$, 功率: $N=0.73\text{kW}$ | 台 | 2 | 一用一备 |
| 热水系统循环泵 | 流量: $Q=4.6\text{m}^3/\text{h}$, 扬程: $H=4.2\text{m}$, 功率: $N=0.17\text{kW}$ | 台 | 2 | 一用一备 |
| 热泵循环泵 | 流量: $Q=16\text{m}^3/\text{h}$, 扬程: $H=15.6\text{m}$, 功率: $N=1.5\text{kW}$ | 台 | 2 | 一用一备 |
| 软水处理装置 | 加药量: 20kg | 个 | 1 | 归丽晶 |
| 管道式电加热器 | 功率: $N=100\text{kW}$ | 台 | 1 | —— |

3 系统设计分析

太阳能资源在时间和空间上分布不均匀, 系统稳定性容易受太阳能辐照量的影响, 在太阳能辐射量不足的情况下, 无法有效保证供暖和热水供应的连续性。

热泵系统单独进行制热或制冷时会出现运行效率低同时也无法充分保证其供热或制冷的稳定性。

太阳能与空气源热泵耦合生活热水系统, 利用可再生能源, 充分发挥二者优势, 既弥补了单一太阳能热水系统的间歇性、不稳定的缺陷, 又改善了空气源热泵在寒冷季节的低温运行工况。

该热水系统利用运行成本低的太阳能, 提高了蓄热水箱的最低温度, 降低了空气源热泵的运行负荷。当热水需求量低时, 仅开启太阳能换热系统或部分空气源热泵主机即可, 不仅可以避免能源浪费, 也能够降低运营成本。双水箱系统储热能力强、稳定性高、升温快, 为热水稳定供应增添一道保障。

4 经济性 & 环境效益分析

4.1 经济性分析

考虑集热器的集热效率及集热系统管路热损失, 根据公式 (10), 太阳能系统全年可提供热量为 189704.77MJ。

$$Q_r = \sum_{i=1}^{365} J_t A_{jz} \eta_j (1 - \eta_l) \quad (10)$$

由表 2 可知, 在提供相同热量情况下, 若采用常规燃气锅炉系统, 在提供相同能量条件下, 25 年寿命期内解决能源费用为 55.33 万元; 若采用电锅炉热水系统, 在提供相同能量条件下, 25 年寿命期内解决能源费用为 77.33 万元; 太阳能系统, 能源运行费用为 0。

表 2 能源费用对比

Table 2 Comparison of energy costs

| 项目 | 燃气 | 电力 | 太阳能 |
|---|-----------|-----------|-----------|
| 年提供能量/MJ | 189704.77 | 189704.77 | 189704.77 |
| 能源单位热值/MJ (燃气 /Nm ³ , 电/kWh) | 36.43 | 3.60 | — |
| 常规能源效率/% | 0.80 | 0.90 | — |
| 年需要常规能源量 (燃气 /Nm ³ , 电/kWh) | 6509.22 | 58550.85 | — |
| 能源价格/元 (燃气 /Nm ³ , 电/kWh) | 3.40 | 0.5283 | 0.00 |
| 年能源费用/万元 | 2.21 | 3.09 | 0.00 |
| 寿命期内能源费用/万元 | 55.33 | 77.33 | 0.00 |

4.2 环境效益分析

本可再生能源热水系统与燃气热水系统和电锅炉热水系统对比, 可减少烟尘、CO₂、SO₂、NO_x 的排放量, 减排量和节约标准煤量如表 3 所示。

表 3 环境效益分析

Table 3 Environmental benefit analysis

| 项目 | 较于燃气热水系统 | 较于电锅炉热水系统 |
|-----------------------|----------|-----------|
| 标准煤/kgce | 7.90 | 21.19 |
| 烟尘减排量/t | 382.58 | 1025.57 |
| CO ₂ 减排量/t | 20.95 | 56.15 |
| SO ₂ 减排量/t | 1.41 | 3.77 |
| NO _x 减排量/t | 0.69 | 1.86 |

5 结论

可再生能源热水系统可考虑太阳能和空气能, 本项目采用太阳能+空气源热泵+电辅助加热的集中热水系统, 具有稳定可靠、节能环保、运行效率高、运行成本相对较低等优点, 系统设计时, 应结合当地全年日照情况、气候环境、服务建筑热水使用需求等多重因素, 采取合理的系统耦合形式, 制定运行模式和控制策略, 提高系统运行效率和稳定性, 对比传统燃气、电力能源, 寿命期内能源费用比燃气节省 55.33 万元, 比电力节省 77.33 万元, 提高了环境效益, 减少了烟尘、CO₂、SO₂、NO_x 的排放量, 充分发挥可再生能源系统的优势。

参考文献:

- [1] 李文甲. 光伏—光热—热化学互补的太阳能利用理论、方法与系统[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- [2] 张文建, 何玉林, 刘健. 中国太阳能资源利用现状及发展趋势[J]. 装备制造技术, 2014, (11): 137-138, 143.
- [3] 任林昌. 太阳能光热利用的应用与发展[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(32): 93.
- [4] 满祥, 庞茂龙, 郑晓通, 等. 空气源热泵-太阳能耦合技术在被动式建筑中的应用与分析[J]. 安装, 2024, (2): 88-89.
- [5] 诸葛梦晴. 太阳能—空气源热泵热水系统在学校公寓的设计应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (4): 59-61.
- [6] 周津津. 太阳能与空气源热泵双热源热水系统的设计与研究[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(10): 134-136.

(下转第 852 页)

道造价约为工可阶段造价的 51%。工期方面,优化后的轻轨东线隧道,全线工期可缩短 8~10 个月,跨海段可缩短 4~6 个月。

在隧道通风设计中,主要参考美国规范,隧道暗埋段长度超过 305m(1000 英尺)时设置机械通风系统,隧道长度在 61m(200 英尺)~305m(1000 英尺)时可设置非机械通风系统。隧道风机及对应阀门耐火要求高,应结合业主需求及市场供货情况综合考量设置各设备材料耐火极限。

隧道通风应结合隧道疏散进行设计,根据疏散通道或疏散出口设置情况合理组织通风模式,澳门轻轨东线疏散通道参照《NFPA-130》(2020)进行设置,对于有条件设置出地面疏散救援通道的区间,按照每 762m(2500 英尺)设置一处疏散救援楼梯间,如果无条件设置出地面的楼梯间,如跨海区间,在隧道每隔 244m(800 英尺)设置一处疏散横通道。

参考文献:

- [1] 朱颖心,江亿,杨旭东,等.地铁系统环控方案分析[J].都市快轨交通,1991(1):21-26.
- [2] 华正博.屏蔽门制式地铁轨行区通风模式研究[D].成都:西南交通大学,2012.
- [3] 姜波.地铁运营初期区间隧道气温变化规律研究[J].都市快轨交通,2018,31(2):113-118.
- [4] 翟毅.地铁隧道通风排烟系统构成及火灾工况运行模式[J].建筑科学,2010,(11):3.
- [5] 林瑞海.澳门轨道交通线网探索与实践[J].现代城市轨道交通,2023,(10):1-7.
- [6] 林瑞海,袁智伟.澳门轻轨系统与可持续发展[C].粤港澳可持续发展研讨会,2013.
- [7] 汤树强.澳门氹仔轻轨车站的绿色设计研究[D].泉州:华侨大学,2021.
- [8] 王文敬,梁斌,陈建国.城市轻轨高架桥胶接缝预制节段箱梁的力学性能研究[J].河南大学学报:自然科学版,2017,47(1):108-114.
- [9] 澳门特别行政区政府第 24/95/M 号法令核准防火安全规章[EB/OL]. [2022-03-12]. https://bo.io.gov.mo/bo/i/95/23/declei24_cn.asp.
- [10] 澳门特别行政区政府第 8/2014 号法律预防和控制环境噪音[EB/OL]. [2024-04-9]. https://bo.io.gov.mo/bo/i/2014/34/lei08_cn.asp
- [11] National Fire Protection Association. Standard for fixed guideway transit and passenger rail systems: NFPA 130-2020[S]. US: NFPA, 2020.
- [12] Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways: NFPA 502-2020[S]. US: NFPA, 2020.
- [13] Standard for Smoke Control Systems: NFPA 92-18[S]. US: NFPA, 2018.
- [14] 郝娜.地铁隧道通风系统活塞风井布置探讨[J].城市轨道交通研究,2012,15(8):141-144.
- [15] 安伟光,孔维浩,广大庆,等.地铁隧道活塞风演化规律及其对通风安全的影响[J].安全与环境工程,2023,30(5):84-92.
- [16] 胡浩明.地铁隧道内气流分布特征及排热模式研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
- [17] 李琼.地铁长大区间中间风井设置探讨[J].都市快轨交通,2020,33(4):113-116.
- [18] 张之启.南京地铁过江隧道通风系统方案研究[J].铁道工程学报,2012,29(4):104-107,117.
- [19] 北京市规划委员会.地铁设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [9] 贺伟,朱龙潜.夏热冬暖地区太阳能-空气源热泵热水器的研究[J/OL].制冷与空调, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4519.tb.20240426.1001.002.html>.
- [10] GB 50015-2019,建筑给水排水设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [11] 张志尧,褚赛,林桐,等.集中式太阳能热水系统精细化设计[J].山西建筑,2022,48(20):176-179.

(上接第 845 页)

- [7] 林小辉,张骞,张栋喆,等.高校宿舍太阳能-空气源热泵复合热水系统设计与应用探讨[J].山西建筑,2024,50(13):151-154,198.
- [8] 马一程,席剑飞,蔡杰,等.太阳能-空气源热泵热水系统多水箱设计方案的优化与能效分析[J].太阳能学报,2023,44(10):229-236.