

文章编号: 1671-6612 (2019) 05-530-08

# 居住建筑集中式太阳能生活热水工程 综合评价及应用建议

谢慧<sup>1</sup> 李晓林<sup>1</sup> 郝斌<sup>2</sup> 陆元元<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院 北京 100083;

2. 深圳市建筑科学研究院股份有限公司 深圳 518049)

**【摘要】** 基于系统能量平衡为原理的 Solar-Bus 法, 研究比较了多个中国居住建筑集中式太阳能生活热水 (SDHW) 工程系统的年动态热性能。工程评价指标结果显示, 提升住宅 SDHW 系统热性能需要重视降低系统热损失, 住宅集中集热-分散辅热 (CCDAH) 系统表现出比集中集热-集中辅热 (CCCAH) 系统更好的热性能。住宅系统热性能季节差异明显, 冬季热性能较差。相较而言, 学生宿舍 SDHW 系统具有较好的热性能, 需要进一步研究。经济性分析表明, 辅助能源影响系统经济性, 学生宿舍 SDHW 系统经济性明显优于住宅。中国居住建筑 SDHW 系统的推广应用需要提升整体热性能以及探寻适宜的应用场景。

**【关键词】** 集中式太阳能生活热水系统; 居住建筑; 热性能; 经济性分析  
中图分类号 TU83 文献标识码 B

## Comprehensive Evaluation and Suggestions of Centralized Solar Domestic Hot Water Projects for residential buildings in China

Xie Hui<sup>1</sup> Li Xiaolin<sup>1</sup> Hao Bin<sup>2</sup> Lu Yuanyuan<sup>2</sup>

(1. School of civil and resource engineering, university of science and technology Beijing, Beijing, 100083;

2. Shenzhen Institute of Building Research Co., Ltd, Shenzhen, 518049 )

**【Abstract】** Based on the evaluation method which is based on energy balance of system, this paper studied and compared the annual dynamic thermal performance of several centralized solar domestic hot water (SDHW) systems in residential buildings in China. The evaluation index results of these projects show that it is necessary to pay attention to reducing the heat loss of the system to improve the thermal performance of SDHW systems in dwellings. The centralized-collector/distributed-auxiliary-heating (CCDAH) systems show better thermal performance than centralized-collector/centralized-auxiliary-heating (CCCAH) systems. In general, the thermal performance of the system in dwelling varies significantly in seasons, and the thermal performance in winter is poor. Relatively speaking, the SDHW system of student dormitory has better thermal performance, which needs further research. The economic analysis shows that auxiliary energy affects system economy, and the student dormitory SDHW system is significantly more economical than the system in dwelling. The promotion and application of SDHW system in residential buildings in China needs to improve the overall thermal performance of the system and explore suitable application scenarios to improve the market competitiveness of SDHW in residential buildings.

基金项目: 国家重点研发计划项目“可再生能源绿色建筑领域应用效果研究”(2016YFC0700104)

作者简介: 谢慧 (1977-), 女, 博士, 副教授, E-mail: xiehui20000@ustb.edu.cn

通信作者: 郝斌 (1974-), 男, 博士, 教授级高工, E-mail: haobin@ibrcn.com

收稿日期: 2019-06-10

【Keywords】 centralized solar domestic hot water system; residential building; thermal performance; economic analysis

## 0 引言

目前,化石燃料是制备热水的主要能源,为了避免或减少它们对环境的不利影响,确定替代能源非常重要<sup>[1]</sup>。太阳能光热作为最具成本效益的可再生能源技术之一,在全球拥有巨大的市场潜力<sup>[2]</sup>。截止 2014 年,中国(289.5GWth)和欧洲(47.5GWth)占全球太阳能热利用市场的 82.1%<sup>[3]</sup>。在中国,太阳能利用对可再生能源发展战略具有重要意义<sup>[4]</sup>,中国在太阳能资源方面具有巨大的潜力<sup>[5]</sup>。

近年来,研究人员在太阳能生活热水(SDHW)系统性能方面做了大量工作。一部分研究表明 SDHW 技术有较好的节能性和经济性<sup>[6-8]</sup>,英国一项模拟北方气候下的 SDHW 系统潜力的研究表示如果能源需求和可用性相匹配,太阳能贡献高达 34%<sup>[9]</sup>,希腊一项对使用了 30 年(1978 年至 2007 年)的 SDHW 系统的研究<sup>[10]</sup>显示,安装 SDHW 系统对于节能和减少温室气体排放有显著效果。另外,许多研究通过实验或模拟 SDHW 系统热性能研究其影响因素,Tang 等人<sup>[11]</sup>实验研究了倾斜角度对于系统热性能的影响,Mohamed 等人<sup>[12]</sup>模拟研究了集热回路流速对系统热性能以及经济性的影响,并通过实验验证结果。还有一些研究通过相关标准对 SDHW 系统的热性能进行测试,欧洲的几个实验室对大量太阳能生活热水系统进行了测试和评估<sup>[13]</sup>,Zhang 等人<sup>[14]</sup>采用中国标准测试了 100 多个真空管太阳能系统性能。这些研究通常根据特定的测试条件对产品进行测试,如欧洲的 ISO 9806 (2013) 标准<sup>[15]</sup>或美国的 ASHRAE 93 (2010) 标准<sup>[16]</sup>,中国根据《可再生能源建筑应用工程评价标准》(GB/T 50801-2013)<sup>[17]</sup>对 SDHW 系统进行测试评价。这些测试可以在模拟太阳能或真实太阳能条件下进行稳态和准动态检测。然而,它们并未考虑现实热水需求对整个系统效率的影响<sup>[18]</sup>,以上热性能研究大部分都是在室内实验室进行的<sup>[19]</sup>或设定热水需求曲线来确定 SDHW 系统效率<sup>[20]</sup>。

中国目前的 SDHW 系统评价方法中太阳能保证率是重要的评价指标,调查显示,中国各省太阳能光热建筑应用示范项目全年太阳能保证率普遍在 60%左右,其中太阳能保证率在 50%以上的地区占 86%<sup>[21]</sup>,但中国市场调研发现 SDHW 系统实际

应用中仍然存在较多问题,用户、开发商以及工程建设方对于 SDHW 系统使用评价不高<sup>[22,23]</sup>。有研究指出,中国目前的 SDHW 系统评价方法中针对集热系统热性能,而未对整个系统的热性能进行考量,因此难以对工程实际运行状况和节能效果进行评价<sup>[21]</sup>。彭琛,郝斌等人<sup>[24]</sup>提出 SDHW 系统的新评价方法——Solar-Bus 法,该方法构建 SDHW 系统的热性能状况的新评价指标体系。本文基于该方法在真实的热热水需求下全面地评估中国多个气候区运行期间的居住建筑集中式 SDHW 工程,坚持“以实际运行能耗为导向”<sup>[25]</sup>,从而反映系统中辅助能源真实消耗水平和太阳能的实际利用情况,也间接反映系统设计和应用效果的好坏<sup>[26]</sup>。

## 1 工程案例概况

本文调研的 6 个 SDHW 系统工程分布在北京、天津、宁夏、广东、上海 5 个省份,包括 3 个气候区:寒冷地区、夏热冬冷地区以及夏热冬暖地区,包括 5 个住宅 SDHW 工程以及 1 个学生宿舍 SDHW 工程。

### 1.1 住宅 SDHW 工程

集中式 SDHW 系统将太阳能集热器集中、统一规划安装于建筑物屋面部分,根据《民用建筑太阳能生活热水系统应用技术规范》(GB 50364-2018)<sup>[27]</sup>,按照辅助能源的加热方式可以分为两种系统形式:集中辅助加热系统以及分散辅助加热系统。集中集热-集中辅热(CCCA)系统是指太阳能集热器、贮热水箱、辅助加热设备全部集成化,然后将热量分配至各用水终端的 SDHW 系统;集中集热-分散辅热(CCDA)系统是指供热水箱、辅助加热系统按终端用户为单位独立设置的 SDHW 系统。

本文调研的住宅 SDHW 工程系统参数如表 1 所示。其中,CCCA 系统规模相对较大,其集热面积均远远大于 CCDA 系统,如表 2 所示。北京与深圳 CCCA 系统的用户远多于其他系统。从户均集热面积上来看,CCDA 系统则相对较高。尤其是深圳工程为 26 层高层建筑,尽管该系统总集热面积最大,户均集热面积反而最小。

表 1 住宅 SDHW 工程相关系统参数

Table 1 Related system parameters of solar domestic water heating projects in residential houses

工程	系统形式	类型	集热器		水箱容积		辅助热源	循环方式
			面积 (m <sup>2</sup> )	安装角度 (°)	贮热水箱 (m <sup>3</sup> )	供热水箱 (m <sup>3</sup> )		
北京	CCCAH	平板	242	42	25	—	燃气壁挂炉	24 小时
深圳	CCCAH	平板	206	32	18	—	燃气锅炉	24 小时
天津	CCDAH	真空管	64	37	1	0.12	电加热	分时段
银川 1	CCDAH	真空管	87	3	0.3	0.08-0.12	电加热	分时段
银川 2	CCDAH	热管	37	15	0.1	0.08	电加热	分时段

注：集中-分散（集中集热-分散辅热）系统的供热水箱为户内水箱。

表 2 住宅系统供应户数以及户均集热面积

Table 2 Number of households supplied by the domestic system and per capita heat collection area

工程	北京	深圳	天津	银川 1	银川 2
层数	19	26	18	11	9
户数	148	312	36	22	18
户均集热面积 (m <sup>2</sup> /户)	1.64	0.66	1.78	3.98	2.10

1.2 学生宿舍 SDHW 工程

上海某学生宿舍 SDHW 系统配有数据监测平台，该系统采用玻璃热管式集热器，集热面积为 230m<sup>2</sup>，置于屋顶。二层裙楼楼顶设置有贮热水箱和恒温供热水箱，贮热水箱容积为 12m<sup>3</sup>，供热水箱容积为 6.75m<sup>3</sup>。集热水箱由三台制热量为 36kW 的空气源热泵辅助加热，供热水箱由 9kW 的电伴热辅助加热。

学生宿舍共六层，系统采用 CCCAH 系统，供 450 人左右洗浴用水，定时供水时间为 15:00~22:45，供水温度为 50~52℃。监测系统示意图如图 1 所示。

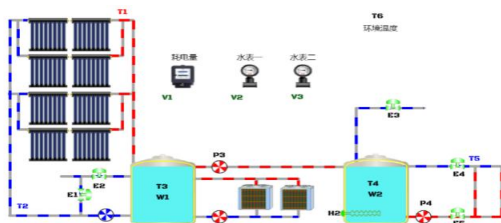


图 1 监测系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the monitoring system

2 热性能评价方法

本文采用 Solar-Bus 法对 SDHW 系统进行热性能评价，该方法基于系统的能量平衡，故命名为

Solar Balance of Use and Supply 法，简称为 Solar-Bus 法。

Solar-Bus 法首先分析系统的能量来源和去向，能量输入包括集热系统得热量和辅助能源加热量两项，能量输出包括用户用热量和系统散热量，如图 2 所示。

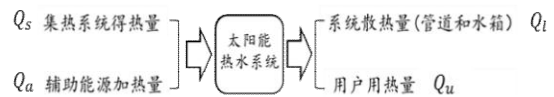


图 2 太阳能生活热水系统能量平衡

Fig.2 Energy balance of solar hot water system

根据“两进两出”能量平衡关系，以上四部分能量满足：

$$Q_s + Q_a - Q_i - Q_u = 0 \tag{1}$$

式中， $Q_s$ 为集热系统得热量； $Q_a$ 为辅助能源加热量； $Q_i$ 为系统散热量； $Q_u$ 为用户用热量。

其次，该方法构建新评价指标体系<sup>[21]</sup>，如表 3 所示。其中包括能够唯一刻画 SDHW 系统热性能状况的三个评价指标和一个节能效果评价指标，其中两个指标已写入《民用建筑绿色性能计算标准》(JGJ/T 449-2018)<sup>[28]</sup>。

表 3 Solar-Bus 法评价指标体系

Table 3 Evaluation index system of Solar-Bus method

指标	表达式	意义
太阳能贡献率	$\eta_c = \frac{Q_s - Q_i}{Q_u}$	系统中太阳能有效得热量对用户实际需求的贡献程度
太阳能有效利用率	$\eta_e = \frac{Q_s - Q_i}{Q_s}$	系统对太阳能的利用效率，即用户实际利用到的热量占太阳能热水系统中集热系统得热量的比例

续表 3 Solar-Bus 法评价指标体系

指标	表达式	意义
系统热损比	$\mu = \frac{Q_l}{Q_u}$	系统的散热情况, 更直观地表现损失与收益之间的关系
吨热水能耗	—	每吨热水实际能耗, 最直接反映太阳能热水系统节能效果

最后, 该方法提出对应评价指标体系所需四部分能量的测算方法<sup>[24]</sup>。测算方法从现有追踪太阳能、主要关注集热侧转变为追踪常规能源, 主要关注用热侧。同时从现有短期检测为主转变为长期监测(全年模拟)整个系统热量状况, 更接近实际地反映系统实际运行中的热性能和能耗水平<sup>[24]</sup>。各工程测算数据来源如表 4 所示。

表 4 工程测算数据来源

Table 4 Data sources of measured engineering

工程	系统集热	辅助能源消耗	用水量	系统散热
北京	全年模拟	计量	计量	能量平衡
深圳	全年模拟	计量	计量	能量平衡
天津	全年模拟	能量平衡	调研	测量计算 [圆筒壁模型]
银川 1	全年模拟	长期监测	调研	能量平衡
银川 2	全年模拟	长期监测	调研	能量平衡
上海	全年模拟	长期监测	长期监测	能量平衡

### 3 热性能评价结果与讨论

由于以上 SDHW 工程的系统形式、大小以及运行情况存在较大差异, 为了便于进行系统热性能的横向对比, 本文以最终用户的热耗为标准, 对四部分能量进行了标准化。在标准化过程中, 最终用户的热耗设定为 100, 标准化后的结果如表 5 所示。

表 5 系统运行能耗结果

Table 5 System operation energy consumption results

工程	运行时间	集热系统得热量	辅助能源加热量	系统散热量	用户用热量
北京	3-11 月	100	112	112	100
深圳	全年	57	152	109	100
天津	全年	81	72	53	100
银川 1	1-10 月	151	49	100	101
银川 2	1-10 月	75	61	36	100
上海	全年	116	31	47	100

注: 北京、银川 1、银川 2 太阳能生活热水系统在冬季

部分时间关闭。

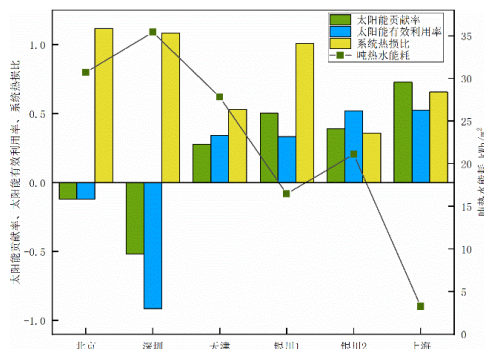


图 3 系统运行阶段评价指标结果

Fig.3 Evaluation index results of system operation stage

图 3 显示了各系统全年运行阶段的评价指标结果, 综合分析各指标结果可以看出:

(1) 北京和深圳 CCCAH 系统太阳能贡献率、太阳能有效利用率为负值, 系统热损比与吨热水能耗较其他系统明显偏高。这两个系统运行期间系统热损失相当严重, 散热量甚至高于集热量。其中, 深圳系统由于屋顶被大量的管道、水箱、水泵、辅助热源等占据, 可安装集热板的面积非常小, 户均集热面积约 0.66m<sup>2</sup>, 集热面积不足导致消耗大量的辅助热源, 其吨热水能耗在全部系统中最高。

(2) 天津、银川 1 与银川 2 住宅 CCDAH 系统较 CCCAH 系统有更好的热性能表现, 银川 1 太阳能贡献率最高, 然而其系统热损比偏高。银川 2 系统热性能整体表现更为平稳, 天津系统太阳能贡献率与太阳能有效利用率相对较低, 吨热水能耗较高。

(3) 上海学生宿舍系统与住宅系统相比, 其太阳能贡献率与太阳能有效利用率最高, 该系统的吨热水能耗远低于住宅系统。

#### 3.1 太阳能贡献率

图 4 显示了各系统的太阳能贡献率的全年变化趋势, 冬季的太阳能贡献率明显低于其他季节。住宅 CCDAH 系统在太阳能贡献率这一指标上较 CCCAH 系统表现好, 其中银川 1 系统户均集热面积远高于其他系统, 因此该系统的集热量有效满足用户用热, 该系统太阳能贡献率较高。天津系统在一月和十二月太阳能贡献率出现负值, 该系统冬季热损失较大。而对于住宅 CCCAH 系统, 只有在夏季才真正做到为用户提供热量。

上海学生宿舍系统太阳能贡献率在二月骤减,

出现负值。这是由于二月份为学校寒假，全月用水量仅有 13 吨。因此，集热量被大量浪费，同时仍需提供辅助能源保证留校学生在系统有效集热时间段外的用水需求。除二月份外，该系统其他月份的太阳能贡献率均高于 0.5。七八月份暑假期间的用水量也有所下降，故七八月份较夏季其他月份的太阳能贡献率要小。因此，对于学生宿舍系统，假期用水量变化对于太阳能贡献率的影响要明显大于季节因素。

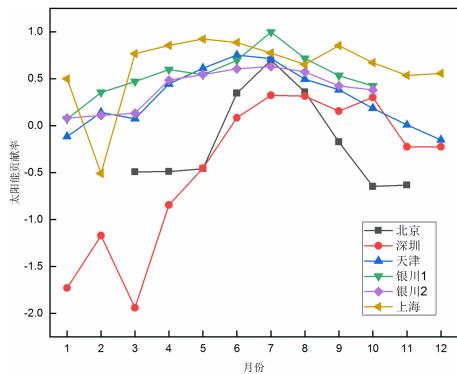


图 4 系统年度太阳能贡献率

Fig.4 Systems' annual solar contribution ratio

### 3.2 太阳能有效利用率

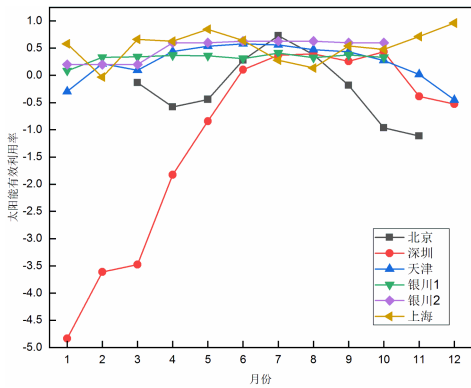


图 5 系统年度太阳能有效利用率

Fig.5 Systems' annual solar effective utilization

图 5 显示了各系统的太阳能有效利用率的年度动态变化。住宅 CCCAH 系统的太阳能有效利用率这一指标在夏季表现良好。住宅 CCDAH 系统中，天津系统冬季的太阳能有效利用率下降趋势较为显著，尽管银川 1 系统的太阳能集热量过大，远大于用户需求热量，散热损失偏大，因此太阳能有效利用程度反而较银川 2 系统低。

上海学生宿舍系统的太阳能有效利用率同样在寒暑假期间有所下降，在十一月以及十二月的太

阳能有效利用率较高，这意味着太阳能集热量被真正利用的比例较高，系统散热比例较小。一方面该系统为定时供水，有效减少全天候循环带来的热损失；另一方面该系统夏季未被利用的集热量散失大于该系统十一月、十二月的循环散热损失，因此十一月与十二月太阳能有效利用部分比例反而较高。

### 3.3 系统热损比

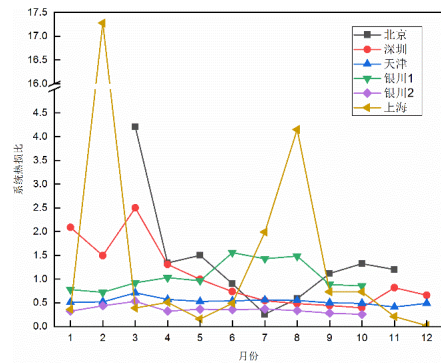


图 6 系统年度系统热损比

Fig.6 Systems' annual unit hot water heat loss

图 6 显示各系统全年系统热损比的全年动态变化情况。住宅 CCCAH 系统热损比全年波动较大，夏季系统热损比明显降低，而冬季热损比远大于 CCDAH 系统。一方面，由于 CCDAH 系统只需通过末端辅热保证用户用水温度，而 CCCAH 系统需要维持水箱最低温度，由辅助能源集中加热热水后进行输配，高温流体散热导致的管路散热量更大<sup>[29]</sup>。另一方面，两个住宅 CCCAH 系统均为 24 小时循环运行，造成系统热损失严重。上海学生宿舍系统热损比小于住宅系统，该系统除寒暑假外的其他月份的系统热损比均低于 0.8。

### 3.4 吨热水能耗

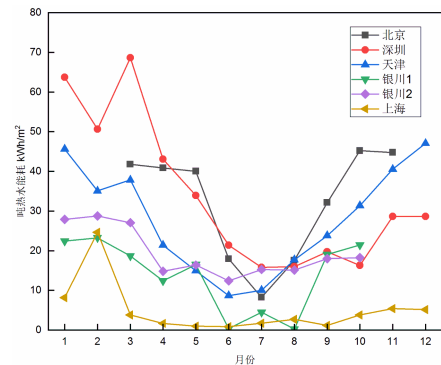


图 7 系统年度吨热水能耗

Fig.7 Domestic systems' annual unit hot water conventional energy consumption

若居民采用电加热将一吨水加热 30℃, 吨热水能耗约为 35kWh/m<sup>3</sup>。图 7 显示, 住宅 CCDAH 系统的冬季吨热水能耗超过 40kWh/m<sup>3</sup>, 夏季吨热水能耗则明显降低。系统热性能表现显著影响吨热水能耗, 深圳系统吨热水能耗在全部系统中最高。CCDAH 系统中, 天津系统冬季吨热水能耗偏高, 银川 1 和银川 2 系统全年逐月吨热水能耗均低于 30kWh/m<sup>3</sup>, 系统节能效果较好。

上海学生宿舍系统全年吨热水能耗波动较小, 在寒暑假期间该系统需要避免系统“大马拉小车”而导致热水能耗偏高。其他月份吨热水能耗均小于

10kWh/m<sup>3</sup>, 远远低于住宅系统。一方面, 综合其他评价指标可以看出该系统热性能表现更好, 另一方面, 该系统采用空气热源热泵作为辅助能源, 节能效果更为显著。

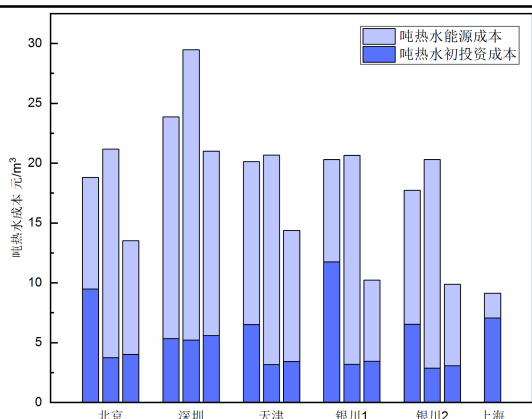
#### 4 经济性分析

考虑到 SDHW 系统的寿命期为 13 年<sup>[30]</sup>, 根据调研, 平板集热器系统为 1200~2000 元/m<sup>2</sup>, 真空管集热器为 800~1200 元/m<sup>2</sup>, 系统初投资考虑以及各地区居民电价和天然气价格如表 6 所示。

表 6 各系统初投资以及能源价格

Table 6 Initial investment of the system and energy price

工程	初投资		居民电价 元/kWh	天然气价格 元/m <sup>3</sup>
	集热系统	其他		
北京	2000 元/m <sup>2</sup>	燃气壁挂炉锅炉: 25000 元	0.4883	2.28
深圳	2000 元/m <sup>2</sup>	燃气锅炉: 25000 元	0.68	3.70
天津	1000 元/m <sup>2</sup>	户内水箱: 1000 元/户	0.49	2.63
银川 1、2	1000 元/m <sup>2</sup>	户内水箱: 1000 元/户	0.4886	1.63
上海	1000 元/m <sup>2</sup>	空气源热泵: 3*20000 元	0.636	3.00



左: 实际太阳能热水系统, 中: 住宅电热水器, 右: 住宅燃气热水器

图 8 系统吨热水初投资成本与能源成本

Fig.8 Initial investment cost and energy cost of system tons of hot water

2007 年, 中国电热水器和燃气热水器在热水器市场份额分别为 42.3%和 19.2%<sup>[31]</sup>。若以上住宅居民采用电或燃气热水器制备热水, 根据我国《家用电器安全使用年限细则》, 电和燃气热水器的安全使用年限分别为 5 年和 8 年。电热水器和燃气热水器初始投资分别为 560 元和 833 元, 它们的热效

率分别为 98%和 84%<sup>[5]</sup>。当加热一吨水温升为 30℃, 则电热水器耗电 35.71kWh, 燃气热水器耗气量为 4.17m<sup>3</sup>。图 8 显示了 SDHW 系统以及住宅使用电、燃气热水器时的吨热水初投资以及能源成本的结果。

除深圳系统以外的其他住宅 SDHW 系统初投资明显高于电、燃气热水器。对于 SDHW 系统而言, 一定程度上来看, 初投资成本提高, 则能源成本降低, 如银川 1 系统。SDHW 系统吨热水能源成本较高的主要原因是由于热性能表现不佳, 其吨热水能源成本介于电热水器与燃气热水器两者之间。由于加热一吨水温升为 30℃时, 由上述耗电量和耗气量以及各地电价和燃气价格可知, 电费为 17.4~24.3 元, 而燃气费为 6.8~15.4 元。因此, 尽管采用燃气作为制备热水的能源并没有节能效果, 但具有明显的经济性优势。北京系统采用燃气作为辅助能源, 其吨热水能耗偏高, 但吨热水能源成本甚至低于天津与银川 2 系统。

上海学生宿舍系统吨热水能源成本具有显著优势, 尽管空气源热泵的应用增加了该系统的初投资, 但是由于该系统热性能表现较好, 大大降低了

吨热水能耗,且热泵的应用显著减少系统电耗,从而降低了系统能源成本。

以上经济性分析不考虑运维成本,结果显示,辅助能源形式对于系统经济性影响较大,且学生宿舍 SDHW 系统较住宅系统有显著的经济性优势。

## 5 居住建筑 SDHW 系统应用建议

大多数居住建筑 SDHW 系统在设计以及运行上存在较大的提升空间。针对本文调研的居住建筑 SDHW 工程应用评价中反映的应用问题,提出以下几点应用建议:

首先,重视控制 SDHW 系统散热量。总体来看,以上居住建筑 SDHW 系统中季节评价指标结果差异性明显,夏季热性能整体表现较冬季更好。但 CCAH 系统全年系统热损失都相当严重,由于系统热损失将直接影响系统节能与经济效益,实际工程必须保证甚至加强规范的系统水箱与管路保温措施,这对于冬季使用 SDHW 系统具有重要意义。若保温措施无法避免冬季系统热损失偏大,应考虑在运行效果较差的冬季不运行使用 SDHW 系统。

其次,对于辅助能源的选择应综合考虑。第一,在以上住宅工程中,CCDAH 系统全年具有更好的热性能。因此在进行 SDHW 系统设计时,辅助能源位置可结合实际情况优先选择 CCDAH 系统;第二,在热性能表现良好的情况下,学生宿舍采用空气源热泵作为辅助能源,取得显著节能效果。因此,辅助能源的能源形式在一定程度上能够提高系统节能效果,应结合当地实际情况选择热泵作为辅助能源;最后,成本是影响用户对 SDHW 系统认可度的重要因素,考虑辅助能源的价格因素,辅助能源采用燃气较采用电力具有明显的经济优势。

第三,优化系统运行策略。住宅集中式 SDHW 系统循环管道较长,尤其是 CCAH 系统,若采用 24 小时的运行策略将加重循环管路热损失问题。因此,应重视系统运行策略,减少非必需的热水循环,减少供水循环时间,从而降低系统热损失。

最后,探寻居住建筑 SDHW 系统的适宜应用场景。中国居住建筑逐渐往高层建筑发展,与独立住宅不同,这些建筑能够布置太阳能集热器的屋顶空间是有限的。本文调研住宅工程楼层较高且一梯多户,用水点分散,循环管道较长,这是住宅 SDHW

系统未能有效利用太阳能,替代常规能源的主要问题。相较而言,学生宿舍系统热性能表现较好,全年太阳能贡献率与太阳能有效利用率均超过 50%,系统热损比较小。这是由于学生宿舍集中浴室的热水需求在时间和空间上相对集中,即在集中时段有稳定且较大的热水需求,同时系统循环管路简单,用水点集中。总而言之,对于集中式 SDHW 系统在居住建筑中的应用,应从需求上寻找适宜的应用场景,从而发挥太阳能的节能性与经济性。需要说明的是,本文仅对上海学生宿舍 SDHW 系统开展研究,仍需更多的同类型案例来佐证学生宿舍在居住建筑 SDHW 系统中具有应用潜力这一结论。

## 6 结论

住宅 SDHW 系统存在较大的季节性差异,冬季系统热损失较为严重,因此系统热性能较差。而系统热损失与辅助能源位置以及系统运行策略密切相关,应结合实际情况优先选择 CCDAH 系统,并采取合理的运行策略。此外,辅助能源形式与价格显著影响系统经济性。学生宿舍 SDHW 系统热性能以及经济性远远优于住宅 SDHW 系统,学生宿舍集中浴室的用水需求在时间和空间上都相对集中,这对于提升 SDHW 系统热性能和经济性非常有利。因此,未来 SDHW 系统的发展应从需求上寻找适宜的应用场景,从而提高 SDHW 系统的应用效果。

### 参考文献:

- [1] Urban F, Geall S, Wang Y. Solar PV and solar water heaters in China: Different pathways to low carbon energy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64:531-542.
- [2] Wang Z, Yang W, Qiu F, et al. Solar water heating: From theory, application, marketing and research[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015,41: 68-84.
- [3] Mautner F, Weiss W. Solar Heat Worldwide Markets and Contribution to the Energy Supply 2014[J]. IEA Solar Heating Cooling Prog, 2014. <http://www.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2016.pdf>.
- [4] Nogueira C E C, Vidotto M L, Toniazzi F, et al. Software for designing solar water heating systems[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016,58:361-375.

- [5] Han J, Mol A P J, Lu Y. Solar water heaters in China: A new day dawning[J]. *Energy Policy*, 2010,38(1):383-391.
- [6] Li H, Yang H. Potential application of solar thermal systems for hot water production in Hongkong[J]. *Applied Energy*, 2009,86(2):175-180.
- [7] Zainine M A, Mezni T, Dakhlaoui M A, et al. Energetic performance and economic analysis of a solar water heating system for different flow rates values: A case study[J]. *Solar Energy*, 2017,147:164-180.
- [8] 赵芳,廖胜明.基于典型用水模式下太阳能生活热水系统性能分析与优化[J].*建筑节能*,2011,39(7):12-15.
- [9] Ampatzi E, Knight I, Wiltshire R. The potential contribution of solar thermal collection and storage systems to meeting the energy requirements of North European Housing[J]. *Solar Energy*, 2013,91:402-421.
- [10] Tsilingiridis G, Martinopoulos G. Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece-energy and environmental benefits - future perspectives[J]. *Renewable Energy*, 2009,35(2):490-497.
- [11] Tang R, Yang Y, Gao W. Comparative studies on thermal performance of water-in-glass evacuated tube solar water heaters with different collector tilt-angles[J]. *Solar Energy*, 2011,85(7):1381-1389.
- [12] Zainine M A, Mezni T, Dakhlaoui M A, et al. Energetic performance and economic analysis of a solar water heating system for different flow rates values: A case study[J]. *Solar Energy*, 2017,147:164-180.
- [13] Carvalho M J, Naron D J. Comparison of test methods for evaluation of thermal performance of preheat and solar-only factory made systems[J]. *Solar Energy*, 2001,69(supp-S6):145-156.
- [14] Zhang X, You S, Xu W, et al. Experimental investigation of the higher coefficient of thermal performance for water-in-glass evacuated tube solar water heaters in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78:386-392.
- [15] EN ISO 9806-2013, Solar energy - Solar thermal collectors-Test methods[S].
- [16] ASHRAE 93-2010, Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors[S].
- [17] GB/T 50801-2013,可再生能源建筑应用工程评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [18] Shi J, Lin K W, Chen Z Q, et al. Annual dynamic thermal performance of solar water heaters: a case study in China's Jiangsu province[J]. *Energy and Buildings*, 2018,173:399-408.
- [19] Nkwetta D N, Smyth M. Performance analysis and comparison of concentrated evacuated tube heat pipe solar collectors[J]. *Applied Energy*, 2012,98:22-32.
- [20] Ayompe L M, Duffy A, Kever M M, et al. Comparative field performance study of flat plate and heat pipe evacuated tube collectors (ETCs) for domestic water heating systems in a temperate climate[J]. *Energy*, 2011,36(5):3370-3378.
- [21] 彭琛,郝斌,郭嘉羽,等.关于太阳能生活热水系统热性能评价指标体系研究[J].*建设科技*,2016,15(16):40-44.
- [22] Chen X L, Hao B, Liu S, et al. Study on Demand-side Design Parameters of Solar Domestic Hot Water System in Residential Buildings[J]. *Energy Procedia*, 2015,70:340-346.
- [23] Yao C N, Hao B, Liu S, et al. Analysis for Common Problems in Solar Domestic Hot Water System Field-testing in China[J]. *Energy Procedia*, 2015,70:402-408.
- [24] 彭琛,郝斌.从“太阳能”到太阳能“能”——太阳能生活热水系统的效能与设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2018,103-108.
- [25] 胡韞频,万晶,汤金才,等.武汉地区太阳能生活热水工程经济性评价[J].*太阳能学报*,2012,33(6):916-921.
- [26] 陈希琳,郝斌,彭琛,等.住宅太阳能生活热水系统测试与调查研究[J].*建筑科学*,2015,31(10):154-161.
- [27] GB 50364-2018,民用建筑太阳能生活热水系统应用技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [28] JGJ/T 449-2018,民用建筑绿色性能计算标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [29] 于瑞,高岩,张野,等.住宅太阳能生活热水系统现状调研及能耗模型研究[J].*建筑科学*,2015,31(10):146-153.
- [30] Li W, Song G, Beresford M, et al. China's transition to green energy systems: The economics of home solar water heaters and their popularization in Dezhou city[J]. *Energy Policy*, 2011,39(10):5909-5919.
- [31] 罗振涛,霍志臣.谈中国太阳能生活热水器产业及其发展规划[J].*太阳能*,2009,30(8):11-14.