

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202011009



# 寒冷地区村镇住宅建筑单热源 供热系统设计与优化

刘吉宏, 张赫男, 魏国栋, 程远达

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 对不同规模的村镇住宅建筑供热系统优化设计方案与全生命周期内的经济性展开研究. 首先, 采用 TRNSYS 软件模拟得到  $60\sim 2\,000\text{ m}^2$  范围内不同供热面积村镇住宅建筑的动态热负荷, 并对太阳能、电锅炉、地源热泵及空气源热泵 4 种不同热源供暖系统的控制运行情况进行模拟, 得到不同热源供暖系统在不同供热面积下的优化设计方案. 在此基础上, 对不同热源供暖系统在全生命周期内的经济性进行对比分析, 得到不同村镇住宅建筑供热面积下的热源推荐方案. 结果表明: 对于不同热源供暖系统的总费用, 电锅炉供暖系统最大, 太阳能供暖系统最小, 太阳能供暖系统总费用比电锅炉供暖系统减少近 65%.

**关键词:** 单热源供暖系统; 数值模拟; 能耗分析; 经济性分析

**中图分类号:** TU 833 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)05-0628-08

## Design and Optimization of Single Heat Source Heating System for Rural Residential Buildings in Cold Regions

LIU Jihong, ZHANG Henan, WEI Guodong, CHENG Yuanda

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The optimal design scheme of heating system for rural residential buildings of different sizes and the economy in the whole life cycle are studied. The dynamic thermal load of rural residential buildings with  $60\sim 2\,000\text{ m}^2$  heating areas is obtained by TRNSYS software, the control operation of four different heat source heating systems are simulated, such as solar energy, electric boiler, ground source heat pump and air source heat pump, the optimal design scheme of different heat source heating system under different heating area conditions is obtained. On this basis, the economy of different heat source heating systems in the whole life cycle is compared and analyzed, the recommended heat source schemes under different heating areas of rural residential buildings are obtained. The result shows that among 4 heating systems, the total cost of the electric boiler heating system is maximum, the total cost of the solar energy heating system is minimum. The total cost of the solar energy heating system is nearly 65% less than that of the electric boiler heating system.

**Keywords:** single heat source heating system; numerical simulation; energy consumption analysis; economic analysis

长期以来,我国大量的煤炭消费带来了严重的环境污染问题.北方城镇供暖煤炭消费总量虽然不高,但煤炭燃烧产生的污染物仍对环境产生了严重影响,造成雾霾等恶劣天气现象<sup>[1-2]</sup>.因此,大力发展

**收稿日期:** 2020-11-04

**通信作者:** 程远达(1985-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事建筑节能的研究. E-mail: chengyuanda@tyut.edu.cn.

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2018YFD1100701)

可再生能源的清洁供热技术,减少北方城镇供暖的煤炭消费量,是实现绿色发展的有效途径之一。

常见的清洁供暖技术包括太阳能供暖、电驱动热泵供暖等<sup>[3-5]</sup>,许多学者针对清洁供暖系统进行研究,张志英<sup>[6]</sup>认为最优蓄冷率为40%,蓄冷率超过80%后投资收益较差.李松波<sup>[7]</sup>发现随着钻井深度的增加,太阳能供热作用不断下降,混合热泵运行效率高于单一热泵.尹丽媛<sup>[8]</sup>通过对比热泵在不同季节的运行数据提供供热系统的最优运行方案.赵海国<sup>[9]</sup>发现相比没有蓄能的系统,水蓄冷与地源热泵相结合的系统总投资费用可降低约15%.尹雪芹等<sup>[10]</sup>发现 Energy-bus 近端网式系统可提高系统的能源利用效率,并可提高系统的可靠性及安全性.Labidi 等<sup>[11]</sup>通过优化设计蓄热水罐,改善多能源区域锅炉的运行,并提出一种通用的预测策略.Blaud<sup>[12]</sup>等研究多能源系统(MES)和经济模型预测系统(EMPC)的高级控制,开发多生产者节点软件(MPN).

值得注意的是,现有关于清洁供热系统的研究大多针对大型建筑展开,对不同规模村镇住宅建筑及区域供热等供暖系统的研究较为不足.不同供热面积下,清洁供热系统热源的选择及全生命期的经济性等方面有待进一步研究.针对上述问题,本文以山西省太原地区为例,对不同规模的村镇建筑源清洁供热系统优化设计方案与全生命周期内的经济性展开研究。

# 1 清洁供暖系统及模拟参数

## 1.1 清洁供暖系统

村镇住宅建筑供暖面积共分为 60,200,500,1 000,2 000 m<sup>2</sup> 五个工况,规定供暖面积为 500,1 000,2 000 m<sup>2</sup> 的 3 个工况均为建筑面积一致的单体住宅.清洁供暖系统主要包括太阳能供暖系统、电锅炉供暖系统、地源热泵供暖系统及空气源热泵供暖系统.太阳能供暖系统清洁环保,可就地利用、无需运输,对农村地区尤其具有利用价值.电锅炉供暖系统由于峰谷电价不同,可存储低谷时的电能,用于高峰时刻供电,降低运行费用<sup>[13]</sup>.地源热泵供暖系统的供暖、制冷能量与热量的转化(COP)均较高,能源利用率是燃煤、燃气、燃油等常规能源方式的 3.5 倍及以上<sup>[14]</sup>.空气源热泵系统目前在村镇“煤改电”工程中应用较为广泛,具有适用温度范围广(适用温度为-7~40℃)、运行成本低、清洁无污染的特点<sup>[15-16]</sup>.

## 1.2 模拟参数

太原地区典型气候年的室外温度逐时变化,如图 1 所示.图 1 中: $\theta$  为温度; $t$  为时间.单体建筑围护结构由外墙、内墙、外窗、地面、楼板、屋面等部分组成.不同朝向外墙的窗墙比如下:东边为 0.33;南边为 0.24;西边为 0.36;北边为 0.24.根据 GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》<sup>[17]</sup>对太原地区常见民用住宅建筑围护结构参数进行设置,如表 1 所示.表 1 中: $W$  为传热系数.

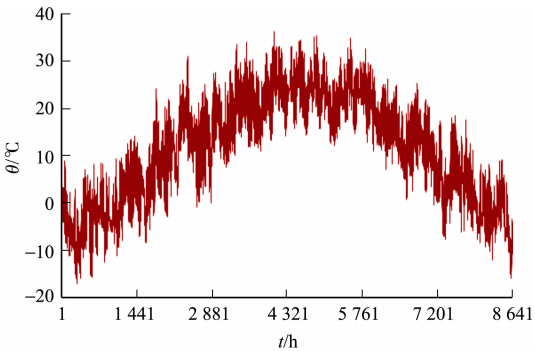


图 1 太原地区典型气候年室外温度逐时变化  
Fig.1 Hourly change of outdoor temperature of typical climate year in Taiyuan area

表 1 建筑围护结构参数设置

Tab.1 Service life and influencing factors of different heat sources

围护结构	构造	$W/m^2 \cdot K$
外墙	外涂料装饰层+聚合物砂浆加强面层+保温层(90 mm 聚苯板)+190 mm 混凝土空心砌块	0.47
内墙	外涂料装饰层+聚合物砂浆加强面层+聚苯颗粒保温浆料找平层+180 mm 现浇混凝土+内墙面刮腻子	1.44
外窗	双层密闭玻璃窗,两层玻璃中间为封闭式空气间层,其厚度为 4 mm,充入干燥空气或惰性气体,玻璃四周密封	2.70
地面	20 mm 石灰砂浆+200 mm 水泥砂浆找平层+20 mm 石灰砂浆	0.89
楼板	20 mm 水泥砂浆+150 mm 钢筋混凝土+30 mm 无机不燃保温砂浆	1.41
屋面	卵石层+保护薄膜+50 mm 挤塑聚苯板保温层+防水层+15 mm 水泥砂浆找平层+最薄为 30 mm 的轻骨料混凝土找坡层+钢筋混凝土屋面板	0.59

根据 GB 50736—2012《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》<sup>[18]</sup>,室内模拟参数设置如下:冬季供暖温度为 18~22 ℃;每小时通风 0.7 次;每小时渗透 0.35 次;灯光功率为 5 W;设备功率为 10 W;每平方米人数为 0.1 人.室内热源包括灯光、设备及人员.

供暖系统的运行时间主要根据供暖系统的使用寿命进行选择.不同热源供暖系统的使用寿命及影响因素,如表 2 所示.经运行维护后,供暖系统的使用寿命均可达 20 a 及以上.因此,以 20 a 作为 4 种单热源供暖系统的生命期进行经济性分析.

表 2 不同热源的使用寿命及影响因素

Tab. 2 Service lives and influencing factors of different heat sources

供暖系统	使用寿命/a	影响因素
太阳能	>15	影响使用寿命的元素主要是橡胶密封件与真空管,更换密封件和真空管后,其延长寿命不少于 10 a
电锅炉	10	影响使用寿命的因素有外部环境、水垢问题、电压问题及使用负载等
地源热泵	15~30	地理管使用年限可达 50 a,一般不需要维护;热泵机组使用年限为 15 a 左右,使用年限的长短与维护相关
空气源热泵	15	影响使用寿命的因素主要有机组运行时间、环境温度、外界因素及压缩机的启停次数等

2 供暖系统模型及建筑供暖动态负荷

2.1 供暖系统模型

4 种单热源供暖系统模型,如图 2 所示.

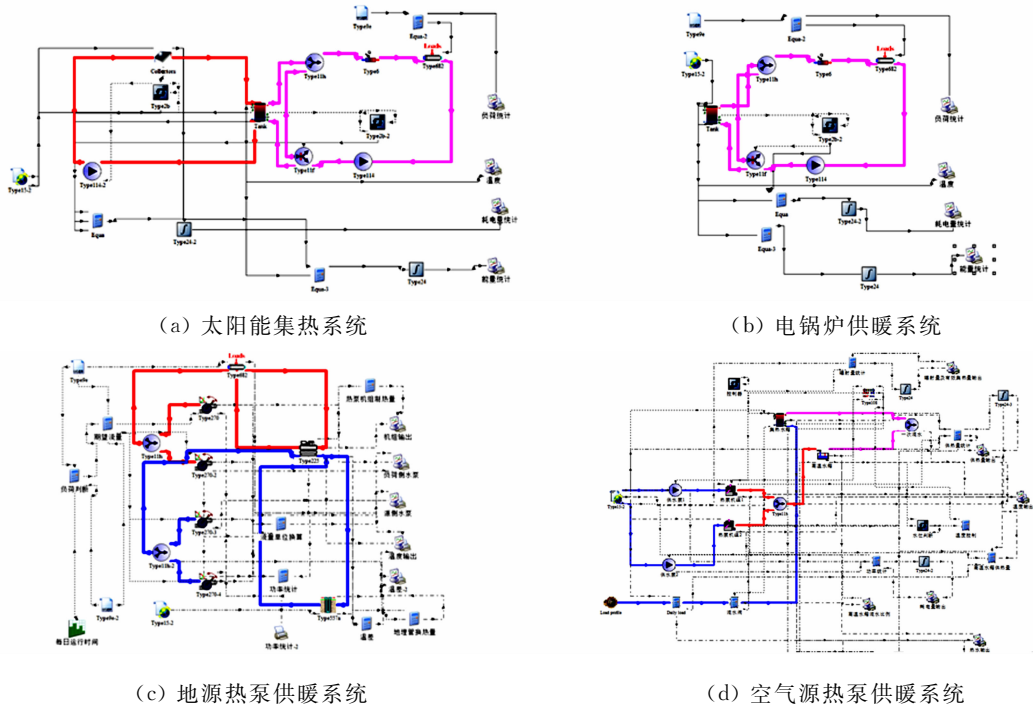


图 2 4 种单热源供暖系统模型

Fig. 2 4 models of single heat source heating systems

由图 2 可知:太阳能供暖系统的源侧主要包括太阳能集热器和水箱,白天用集热水箱蓄热,根据建筑供暖负荷的需求进行供热;电锅炉供暖系统利用电加热器加热水,夜间利用谷电价时段进行蓄热,并根据负荷对建筑进行释能与供能;地源热泵供暖系统以土壤作为低温热源,热泵机组从土壤中吸取热量给建筑供暖;空气源热泵供暖系统以空气作为低温热源,热泵机组从空气吸取热量给建筑供暖.

2.2 建筑供暖动态负荷

太原地区开始供暖的时间是 2019 年 11 月 1 日,结束的时间是 2019 年 3 月 31 日,供暖时间共计 5 个月.面积为 60 m<sup>2</sup> 的建筑热负荷,如图 3 所示.图 3 中:Q 为热负荷.由图 3 可知:热负荷在 11 月份达

到最大值 7.24 kW,单位面积热负荷为 120.6 W·m<sup>-2</sup>. 面积为 200 m<sup>2</sup> 的建筑热负荷,如图 4 所示. 由图 4 可知:面积为 200 m<sup>2</sup> 的建筑热负荷变化趋势与面积为 60 m<sup>2</sup> 相同,最大热负荷均出现在 11 月份,单位面积热负荷为 118.1 W·m<sup>-2</sup>.

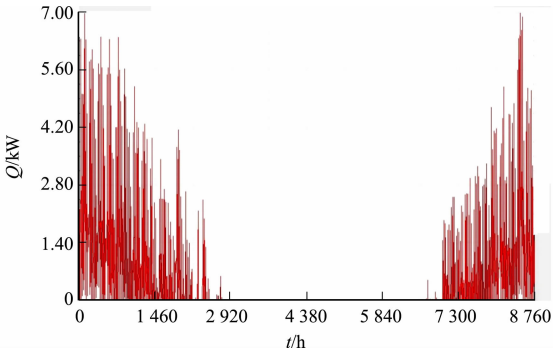


图 3 面积为 60 m<sup>2</sup> 建筑的热负荷  
Fig. 3 Heat load of 60 m<sup>2</sup> building area

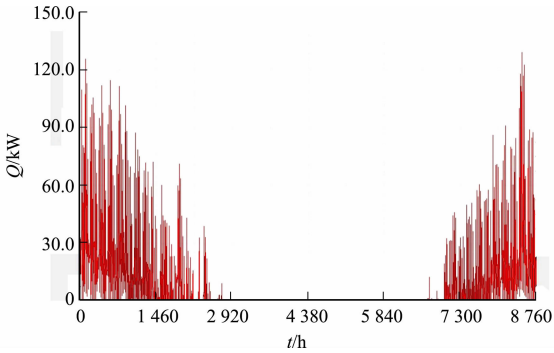


图 4 面积为 200 m<sup>2</sup> 建筑的热负荷  
Fig. 4 Heat load of 200 m<sup>2</sup> building area

在围护结构参数、室内参数等设置一致的前提下,不同面积建筑的单位供暖负荷基本接近,总负荷与建筑面积成线性相关. 因此,供暖面积为 500,1 000,2 000 m<sup>2</sup> 的供暖热负荷近似成倍数关系.

### 3 不同热源供暖系统优化方案

#### 3.1 太阳能供暖系统

太阳能供暖系统的优化目标是在满足供暖需求的同时达到最优经济性. 因此,根据水箱出口温度、回水温度的平均值及方差对电加热器功率和水箱容积进行优化,得到满足供暖要求的最小集热器面积和水箱容积,计算相应集热器面积与水箱容积下的供暖耗电量. 通过每平方米太阳能集热器的集热量与最大热负荷计算得到集热器的面积,并进行系统的匹配和选型. 通过 10℃ 供回水温度差、24 h 的运行时间、固定流速计算水箱容积. 当建筑面积为 60 m<sup>2</sup> 时,集热器面积为 40 m<sup>2</sup>,水箱容积为 8 m<sup>3</sup> 可满足建筑的供暖要求. 在完整供暖季内,集热器的集热量为 8 338.4 kW·h,水泵耗电量为 364.2 kW·h.

太阳能供暖系统优化值,如表 3 所示. 表 3 中:*s* 为面积;*V* 为水箱容积;*Q* 为耗电量. 由表 3 可知:当集热器面积为 32 m<sup>2</sup>,水箱容积为 5 m<sup>3</sup> 时,太阳能供暖系统能满足面积为 60 m<sup>2</sup> 建筑的供暖需求. 因此,在满足相同供暖需求的条件下,集热器面积由 40 m<sup>2</sup> 降低到 32 m<sup>2</sup>,集热器面积减小了 20%;水箱容积由 8 m<sup>3</sup> 减小到 5 m<sup>3</sup>,水箱容积减小了 37.5%,耗电量降低 4.1%. 太阳能供暖系统逐时动态模拟,如图 5 所示.

表 3 太阳能供暖系统优化值

Tab. 3 Solar heating system optimization value

<i>s</i> (建筑)/m <sup>2</sup>	<i>s</i> (集热器)/m <sup>2</sup>	<i>V</i> /m <sup>3</sup>	<i>Q</i> /kW·h
60	32	5	349.2
200	115	13	768.2
500	280	13	2 793.6
1 000	540	24	4 190.4
2 000	1 110	36	5 978.4

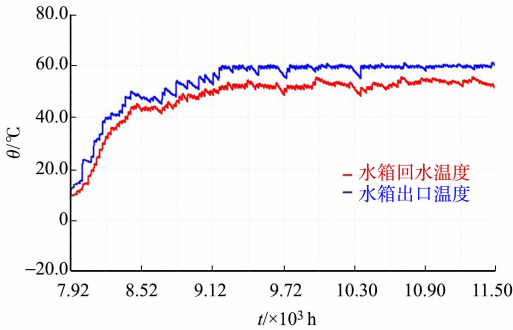


图 5 太阳能供暖系统逐时动态模拟  
Fig. 5 Hourly dynamic simulation of solar energy heating system

#### 3.2 电锅炉供暖系统

电锅炉供暖系统根据水箱出口温度、回水温度的平均值及方差对电加热器功率和水箱容积进行优化,得到对应建筑面积下满足供暖要求的电加热器最大功率和水箱的容积,并计算相应水箱容积下的供暖耗电量. 当建筑面积为 60 m<sup>2</sup> 时,电加热器功率为 4 kW,水箱容积为 2 m<sup>3</sup> 可满足建筑的供暖需求. 完整供暖季内电加热器的耗电量为 7 152.32 kW·h. 水箱尺寸的减小使电锅炉供暖系统体积更加紧凑,提高了土地利用率,电锅炉供暖系统优化值,如表 4 所示. 表 4 中:*p* 为电加热器功率. 由表 4 可知:当电加热器功率为 4 kW,水箱容积为 1 m<sup>3</sup> 时,电锅炉供暖系统同样能满足面积为 60 m<sup>2</sup> 建筑的供暖需求,但水箱



体积与未优化前相比减小了 50%。电锅炉供暖系统逐时动态模拟,如图 6 所示。

表 4 电锅炉供暖系统优化值

Tab. 4 Electric boiler heating system optimization value			
$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$p/\text{kW}$	$V/\text{m}^3$	$Q/\text{kW}\cdot\text{h}$
60	4	1	7 152.3
200	11	2	20 010.4
500	28	4	50 100.0
1 000	50	40	901 050.6
2 000	110	20	185 704.6

3.3 地源热泵供暖系统

按照  $120\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  单位面积热负荷进行模型初选,根据对应的热负荷选择热泵机组和埋管数量,并针对太原地区的气象参数进行地源热泵供暖系统性能的模拟。地源热泵供暖系统根据源侧进出口温度、进出口温度差依次加减埋管的数量,模拟优化状态下的地源热泵供热需求,得到对应建筑面积下满足供暖要求的埋管合理数量,并计算相应埋管数量下的供暖耗电量。

无蓄热条件下,单根埋管的供热量可以保证一户村镇单体建筑供暖使用。地源热泵供暖系统优化值,如表 5 所示。表 5 中: $n$  为埋管数量。由表 5 可知:当  $n$  为 2 根时,地源热泵供暖系统能满足面积为  $500\text{ m}^2$  建筑的供暖需求,此时,地源热泵机组的耗电量为  $16\,457.1\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。埋管数量的减少降低了初投资费用,使地源热泵供暖系统的经济性提高。地源热泵供暖系统逐时动态模拟,如图 7 所示。

表 5 地源热泵供暖系统优化值

Tab. 5 Ground source heat pump heating system optimization value		
$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$n$	$Q/\text{kW}\cdot\text{h}$
60	2	1 974.7
200	2	6 582.7
500	2	16 457.1
1 000	4	32 914.3
2 000	6	65 828.6

3.4 空气源热泵供暖系统

空气源热泵供暖系统根据源侧进出口温度、进出口温度差及负荷侧进出口温度、进出口温度差对空气源热泵机组功率进行优化,得到对应建筑面积下满足供暖要求的最小机组功率,并计算供暖耗电量。空气源热泵供暖系统优化值,如表 6 所示。由表 6 可知:当建筑面积为  $60\text{ m}^2$  时,空气源热泵机组功率为  $4\text{ kW}$  可以满足供暖要求,完整供暖季电加热器的耗电量为  $2\,468.6\text{ kW}\cdot\text{h}$ 。空气源热泵供暖系统逐时动态模拟,如图 8 所示。

表 6 空气源热泵供暖系统优化值

Tab. 6 Air source heat pump heating system optimization value		
$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$p/\text{kW}$	$Q/\text{kW}\cdot\text{h}$
60	4.0	2 468.6
200	12.8	8 228.6
500	32.0	20 571.4
1 000	64.0	41 142.9
2 000	128.0	82 285.7

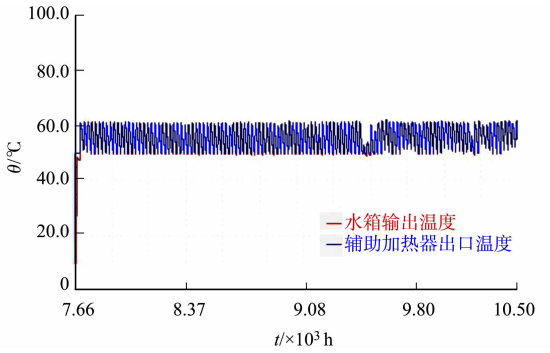


图 6 电锅炉供暖系统逐时动态模拟

Fig. 6 Hourly dynamic simulation of electric boiler heating system

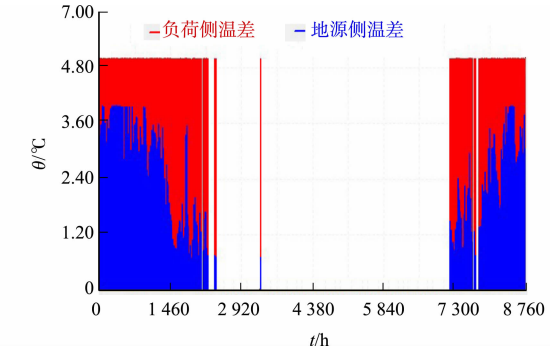


图 7 地源热泵供暖系统逐时动态模拟

Fig. 7 Hourly dynamic simulation of ground source heat pump heating system

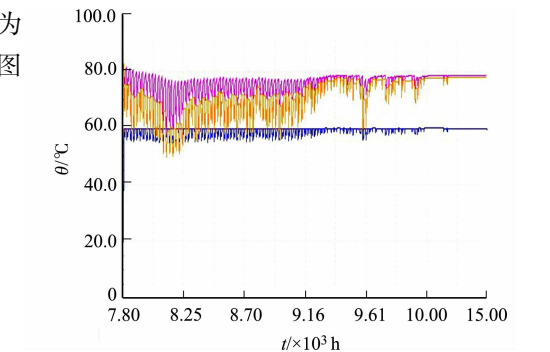


图 8 空气源热泵供暖系统逐时动态模拟

Fig. 8 Hourly dynamic simulation of air source heat pump heating system

4 不同供暖系统的经济性

4.1 不同供暖系统初投资费用

分别对各单热源系统在不同供热面积下的初投资费用进行计算,计算结果如表 7~10 所示.表 7 中: $P$  为初投资费用.表 9 中:埋管费用包括埋管材料费用  $8\,000\text{元}\cdot\text{根}^{-1}$  和打孔费  $2\,000\text{元}\cdot\text{根}^{-1}$ ;热泵机组及水泵的初投资费用包括采购及安装;其他初投资费用包括人工费用安装  $150\text{元}\cdot(\text{人}\cdot\text{天})^{-1}$ ,2 根埋管的地源热泵系统按照 20 个人工计算.

表 7 太阳能供暖系统初投资费用

Tab. 7 Initial investment cost of solar heating system

$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$P(\text{集热器})/\text{万元}$	$P(\text{水箱})/\text{万元}$	$P(\text{水泵})/\text{万元}$	$P(\text{其他})/\text{万元}$	$P(\text{总计})/\text{万元}$
60	2.56	0.6	0.20	0.2	3.56
200	9.20	0.9	0.20	0.3	10.60
500	22.40	1.0	0.26	0.3	23.96
1 000	43.20	2.3	0.30	0.5	46.30
2 000	88.80	2.8	0.50	0.8	92.90

表 8 电锅炉供暖系统初投资费用

Tab. 8 Initial investment cost of electric boiler heating system

$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$P(\text{加热器})/\text{万元}$	$P(\text{水箱})/\text{万元}$	$P(\text{水泵})/\text{万元}$	$P(\text{其他})/\text{万元}$	$P(\text{总计})/\text{万元}$
60	0.01	0.2	0.20	0.2	0.61
200	0.02	0.3	0.20	0.3	0.82
500	0.03	0.5	0.26	0.3	1.09
1 000	0.08	0.8	0.30	0.5	1.68
2 000	0.19	2.0	0.50	0.8	3.49

表 9 地源热泵供暖系统初投资费用

Tab. 9 Initial investment cost of ground source heat pump heating system

$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$P(\text{埋管})/\text{万元}$	$P(\text{水泵})/\text{万元}$	$P(\text{热泵机组})/\text{万元}$	$P(\text{其他})/\text{万元}$	$P(\text{总计})/\text{万元}$
60	2	0.20	0.68	0.5	3.38
200	2	0.20	1.68	0.5	4.38
500	2	0.26	3.98	0.5	6.74
1 000	4	0.30	6.46	0.8	11.56
2 000	6	0.50	13.92	1.0	21.42

由表 7~10 可知:单热源供暖系统初始投资费用按大小排序为  $P(\text{电锅炉供暖系统}) < P(\text{空气源热泵供暖系统}) < P(\text{地源热泵供暖系统}) < P(\text{太阳能供暖系统})$ ;除太阳能供暖系统的初投资费用随着供暖面积的增大而增加外,其余 3 种单热源供暖系统的初投资费用均随着供热面积的增大而减小;当供热系统规模由  $60\text{m}^2$  增加至  $2\,000\text{m}^2$  时,电锅炉供暖系统单位面积的初投资费用从每平方米 101 元降至每平

表 10 空气源热泵供暖系统初投资费用

Tab. 10 Initial investment cost of air source heat pump heating system

$s(\text{建筑})/\text{m}^2$	$P(\text{空气源热泵})/\text{万元}$	$P(\text{其他})/\text{万元}$	$P(\text{总计})/\text{万元}$
60	0.72	0.3	1.02
200	1.82	0.5	2.32
500	3.30	0.8	4.10
1 000	9.25	1.2	10.45
2 000	16.65	2.0	18.65

方米 17 元;地源热泵供暖系统单位面积的初投资费用从每平方米 560 元降至每平方米 107 元;空气源热泵供暖系统单位面积的初投资费用则从每平方米 170 元降至每平方米 93 元.

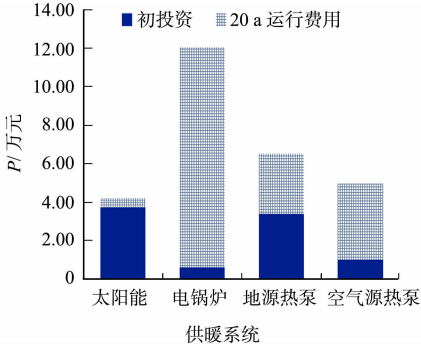
4.2 不同供暖系统运行费用及总费用

以 20 a 作为供暖系统运行周期,计算不同供暖系统在不同供热面积下的运行费用及总费用,如图 9 所示.由图 9 可知:单热源供暖系统按运行费用大小排序为  $P(\text{太阳能供暖系统}) < P(\text{地源热泵供暖系统}) < P(\text{空气源热泵供暖系统}) < P(\text{电锅炉供暖系统})$ .太阳能供暖系统运行费用(0.56~9.57 万元)最低;电锅炉供暖系统运行费用(11.68~141.68)万元最高;地源热泵和空气源热泵供暖系统的运行费用

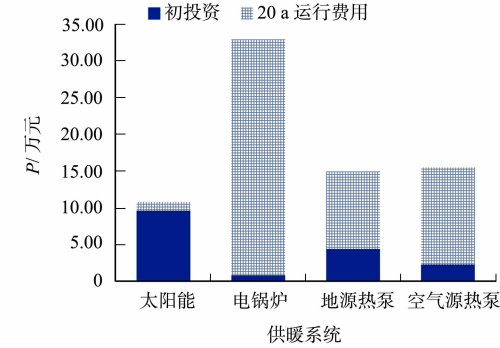
分别是 3.16~105.33,3.95~131.66 万元.

由于太阳能供暖系统的耗电部分仅为电机驱动水泵,因此耗电量最小,运行成本最低;而电锅炉供暖系统的热量完全由电能转化,因此相同供暖负荷下的耗电量最大,运行费用最高.地源热泵供暖系统的耗能部分包括换热机组和水泵运行两部分.空气源热泵供暖系统的耗能部分包括空气源热泵机组和水泵运行两部分,由于冬季工况下,地源热泵供暖系统的 COP 高于空气源热泵供暖系统的 COP,因此相同供暖负荷下,空气源热泵供暖系统运行耗能较大,运行费用较高.

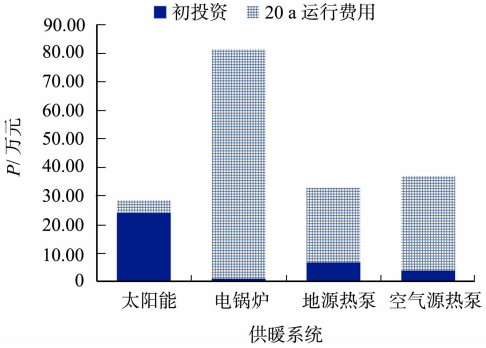
当建筑供暖面积为 60 m<sup>2</sup> 时,单热源供暖系统按总费用大



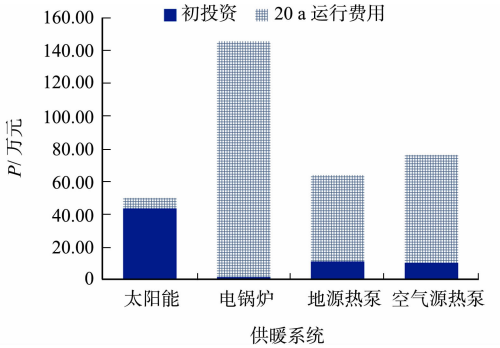
(a) 建筑面积为 60 m<sup>2</sup>



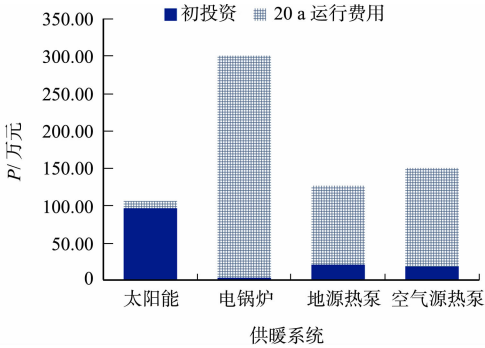
(b) 建筑面积为 200 m<sup>2</sup>



(c) 建筑面积为 500 m<sup>2</sup>



(d) 建筑面积为 1 000 m<sup>2</sup>



(e) 建筑面积为 2 000 m<sup>2</sup>

图 9 各供暖系统生命期内运行费用及总费用

Fig. 9 Operating costs and total cost of each heating system in life cycle

小排序为  $P(\text{太阳能供暖系统}) < P(\text{空气源热泵供暖系统}) < P(\text{地源热泵供暖系统}) < P(\text{电锅炉供暖系统})$ . 太阳能供暖系统总费用为 4.12 万元;而电锅炉供暖系统总费用是太阳能供暖系统的 2.92 倍,达到了 12.05 万元;地源热泵供暖系统和空气源热泵供暖系统的总费用分别是 6.54,4.97 万元.

当建筑供暖面积在 200~2 000 m<sup>2</sup> 时,各供暖系统按运行费用大小排序为  $P(\text{太阳能供暖系统}) < P(\text{地源热泵供暖系统}) < P(\text{空气源热泵供暖系统}) < P(\text{电锅炉供暖系统})$ . 其中,当建筑供暖面积为 200 m<sup>2</sup> 时,太阳能供暖系统的总费用最低(11.83 万元),电锅炉供暖系统总费用(32.84 万元)是太阳能供暖系统的 2.78 倍;地源热泵供暖系统和空气源热泵供暖系统的总费用分别是 14.91,15.49 万元,相差 4%;当建筑供暖面积为 500 m<sup>2</sup> 时,太阳能供暖系统的总费用最低(28.43 万元),电锅炉供暖系统总费用(81.25 万元)是太阳能供暖系统的 2.85 倍;地源热泵供暖系统和空气源热泵供暖系统的总费用分别是 33.07,37.01 万元,相差 11%;当建筑供暖面积为 1 000 m<sup>2</sup> 时,太阳能供暖系统的总费用最低(53.00 万元),电锅炉系统总费用(143.36 万元)是太阳能供暖系统的 2.7 倍;地源热泵供暖系统和空气源热泵供暖系统的总费用分别是 64.22,76.28 万元,相差 16.6%;当建筑供暖面积为 2 000 m<sup>2</sup> 时,太阳能供暖系统的总费用最低(102.47 万元),电锅炉供暖系统总费用(300.62 万元)是太阳能供暖系统的 2.79 倍;地源热泵系统和空气源热泵系统的总费用分别是 126.75,150.31 万元,相差 15.7%.

## 5 结论

- 1) 在满足供暖需求的前提下,以系统经济性最优作为供暖系统的优化目标,根据水箱出口温度、回水温度的平均值及方差对太阳能供暖系统及电锅炉供暖系统进行优化,得到不同供热面积下系统设备的优化设计方案。
- 2) 对于不同供暖系统的初投资费用,太阳能供暖系统最大,电锅炉供暖系统最小,电锅炉供暖系统初投资费用比太阳能供暖系统减少了近 90%。
- 3) 对于不同供暖系统的运行费用,太阳能供暖系统最大,电锅炉供暖系统最小,太阳能供暖系统运行费用比电锅炉供暖系统减少了近 94%。
- 4) 对于不同供暖系统的总费用,电锅炉供暖系统最大,太阳能供暖系统最小,太阳能供暖系统总费用比电锅炉供暖系统减少了近 65%。

### 参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 2020 中国建筑节能年度发展研究报告[D]. 北京:中国建筑工业出版社,2020.

[2] BP. 世界能源统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2018.

[3] 张建东. 热管平板式太阳能集热器热性能的研究[D]. 南京:南京工业大学,2015.

[4] 刘伟. 寒冷地区空气源热泵全年热性能分析与评价[D]. 兰州:兰州理工大学,2015. DOI:10.7666/d.D711629.

[5] 徐伟. 地源热泵技术手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.

[6] 张志英. 地源热泵与水蓄能耦合系统的 TRNSYS 模拟与优化研究[D]. 天津:天津大学,2015. DOI:10.7666/d.D01157658.

[7] 李松波. 混合式地源热泵系统的 TRNSYS 模拟研究[D]. 广州:广东工业大学,2013. DOI:10.7666/d.Y2304599.

[8] 尹丽媛. 基于 TRNSYS 的太阳能耦合土壤源热泵系统仿真研究[D]. 太原:太原理工大学,2013. DOI:10.7666/d.Y2395574.

[9] 赵海国. 地源热泵水蓄能系统在大型公建中的应用[J]. 建设科技,2007,(18):50-51. DOI:10.3969/j.issn.1671-3915.2007.18.022.

[10] 尹雪芹,李晓亮. 区域能源站利用 Energy-bus、地源热泵及水蓄能技术的可行性分析[J]. 制冷空调与电力机械,2011,32(2):22-26. DOI:10.3969/j.issn.2095-3429.2011.02.006.

[11] LABIDI M,EYNARD J,FAUGEROUX O,*et al*. A new strategy based on power demand forecasting to the management of multi-energy district boilers equipped with hot water tanks[J]. Applied Thermal Engineering,2017,113:1366-1380.

[12] BLAUD P C,HAURANT P,CLAVEAU F,*et al*. Modelling and control of multi-energy systems through multiprosumer node and economic model predictive control[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2020,118:1-39. DOI:10.1016/j.ijepes.2019.105778.

[13] 陶庆法,胡杰. 浅层地热能开发利用的现状、发展趋势与对策[J]. 地热能,2007(2):5-10.

[14] WEI Bing,WANG Yizhou,LIU Zhijian,*et al*. Optimization study on a solar-assisted air source heat pump system with energy storage based on the economic method[J]. International Journal of Energy Research,2020,44(3):2023-2036. DOI:10.1002/er.5057.

[15] 董晓铭. 空气源热泵技术难点与应用价值[J]. 科技经济导刊,2020,28(7):71.

[16] 孙亚灿. 基于 MATLAB 与 MCGS 的先进控制算法在工业过程中的研究应用[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2007. DOI:10.7666/d.Y1078293.

[17] 中国建筑科学研究院. 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[18] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2012[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

(责任编辑: 陈志贤

英文审校: 方德平)