

太阳能与地源热泵 在新农村住宅建设中的应用分析

中国建筑科学研究院空气调节研究所 李忠

摘要: 本文以北京郊区的某新农村住宅建设为研究对象,给出了利用太阳能和地源热泵系统来供暖空调以及供生活热水的不同方案,并利用 Retscreen 软件分别对所给出的方案进行了模拟和分析,在上述分析的基础上将太阳能、地源热泵综合利用系统与农村传统使用的房间空调器+燃煤锅炉+电热水器系统进行了经济和节能比较。分析结果表明,在所研究对象条件下,从节能和全寿命费用角度综合来看,采用太阳能供建筑生活热水和采暖+水平式埋管系统空调采暖具有最佳效果,是推荐实施的方案

关键词: 太阳能 地源热泵 新农村建设 供暖空调 生活热水

1 引言

党的十六届五中全会通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议》,提出了建设社会主义新农村的重大历史任务,其中重要的一项就是加强村庄规划和人居环境治理。长期以来,北方农村住宅一般仅利用火炕和火炉取暖,供暖质量不能保证,更谈不上空调和生活热水的供应。为了有效提高农村的人居环境,缩短城乡差距,有必要在有条件的地区为农村住宅增设供暖空调和生活热水供应系统。

农村住宅一般具有建筑容积率较低,没有明显遮挡,能源价格较高,除电力外其他能源一般较短缺的特点,非常适宜于太阳能和地源热泵等新能源系统的应用。作者受委托对北京郊区的某新农村住宅小区应用太阳能和地源热泵系统来供暖空调以及供生活热水的情况进行了分析。分析表明,太阳能和地源热泵系统的应用不仅可以实现供暖空调和生活热水供应的功能,在经济性和节能性方面也具有显著优势。

2 项目概况与负荷分析

本文所研究对象是北京市新农村改造示范项目之一,一期规划建设十四万平方米的回迁楼 23 栋,均为 6 层的多层住宅,每户住宅建筑面积在 75—120 平方米之间,共包含住宅 1416 户,配套公共建筑面积 1000 平方米,屋顶形式为坡屋面。

据建设方提供的规划图和各栋住宅的标准层平面图,作者按照相关标准规范对全部 23 栋回迁楼的生活热水和空调采暖负荷进行了估算,所有住宅楼的汇总见表 1 所示。

表 1 生活热水和空调采暖负荷估算汇总

户数 (户)	面积 (m ²)	总人数 (人)	最高日用 水量(m ³)	采暖负荷 (W)	供冷负荷 (W)	平均日用 水量(m ³)	设计小 时耗热 量(kW)
1375	134118	4748	356.10	5032945	8184585	178.05	2708.29

根据作者以往的工作经验,在缺少相关详细资料的情况下作者在估算中采用了以下假设和估算指标:

(1) 所有住宅均满足北京市地方标准 DBJ 01-602-2004《居住建筑建筑节能设计标准》。

(2) 三室两厅户型按每户 4 人计算热水用量,二室两厅户型按每户 3 人计算热水用量,一室两厅户型按每户 2 人计算热水用量。

(3) 生活热水供水温度 50℃,自来水上水温度 12℃。

(4) 村民最高日用热水量按规范下限选取,折合为 50℃供水温度为每人 75L/

(人·天)，日平均用水量按最高日用热水量的 50% 选用。

(5) 考虑到回迁楼位于市郊，采暖负荷热指标按照 $35\text{W}/\text{m}^2$ 选取，略高于北京市节能设计标准推荐的最高采暖设计热负荷指标 $32\text{W}/\text{m}^2$ 。

(6) 根据经验，住宅空调负荷指标按照 $60\text{W}/\text{m}^2$ 选取。

通过以上方式估算出的生活热水和空调采暖负荷将作为以下系统方案规划和经济分析的基础。

3 方案分析

在本项目中，太阳能可以通过以下两种形式来应用：

(1) 太阳能系统仅供应建筑生活热水。太阳能系统与负责空调采暖地源热泵系统完全独立，与辅助能源一起负责建筑生活热水的供应。太阳能集热系统集热器面积按照生活热水平均日用水量和 60% 的太阳能贡献率来设置。

(2) 太阳能系统可同时供应生活热水和采暖。通过优化控制太阳能系统在生活热水和建筑采暖功能之间的转换，尽可能增加太阳能的利用。在本工程中，当仅考虑在建筑南向坡屋面布置太阳集热器时，满布太阳集热器也不能满足供热能耗要求，本着尽量利用太阳能的原则，在南向坡屋面满布太阳集热器。

由于项目所在地地下水缺乏，也无适当的地表水可资利用，地源热泵系统采用地埋管系统。经地质勘探，当地覆土 25 米以下为厚厚的铁矿岩，垂直埋管困难；且项目所在地有大面积的绿化带可用，因此地源热泵系统选用水平式地埋管系统。

空调采暖系统末端采用常规的风机盘管系统，地源热泵机组采用水—水机组，管路系统采用两管制，太阳能和地源热泵综合利用系统生成的冷热水通过循环泵送入风机盘管中进行空调采暖。生活热水系统采用传统集中供热水系统，只不过热源优先使用太阳能而已。

按太阳能应用方式的不同，作者拟定了以下三种系统作为主要研究对象：

(1) 系统 1：太阳能仅供建筑生活热水，电辅助加热；水平式地埋管系统空调采暖

(2) 系统 2：太阳能仅供建筑生活热水，水平式地埋管系统辅助加热；水平式地埋管系统空调采暖

(3) 系统 3：太阳能供建筑生活热水和采暖；水平式地埋管系统空调采暖

4 系统运行模拟

由于太阳能具有能流密度低以及能量供应具有间歇性和不可靠性的特点，为保证空调采暖系统的可靠性，在对地源热泵系统进行选型时，不应考虑太阳能的作用，而仍需按照空调采暖负荷要求对地源热泵系统进行选型。因此，作者将太阳能系统和地源热泵系统先各自独立进行分析和讨论，再根据需要将它们组合成为适当的系统。

4.1 太阳能系统

在太阳能系统模拟计算中作者以北京市月平均气象参数为基础，采用 f-chart 法计算，集热器采用常规的 $1 \times 2\text{m}$ 的平板集热器，安装角度与北京地区纬度相同，为 40 度正南向安装。

4.1.1 太阳能系统仅供应建筑生活热水

表 2 太阳能系统仅供应建筑生活热水时系统选型与模拟结果 太阳能保证率 $f=60\%$

集热器数量	集热器面积 m^2	年水泵耗电量 MWh	全年太阳能得热量 MWh	贮热水箱容积 m^3	有效贮热容积 m^3	设计小时耗热量 kW	辅助热源用电加热	辅助热源用地埋管			
							辅助热源功率 kW	盘管长度 m	年耗电量 MWh	所需地表面积 m^2	地热提供热量 MWh
1756	3512	32.48	1734.36	210.72	70.2	2708.29	1932.24	45195	323.8	40676	814.07

表2给出了太阳能系统仅供应建筑生活热水时通过 Retscreen 软件模拟得出的各楼太阳能系统的选型和运行结果。在模拟过程中,系统太阳能保证率取为 60%,太阳能集热系统采用单水箱间接式系统,供水温度 50℃。

从模拟结果中可以看出,如果采用地源热泵作为系统辅助热源,地热能和太阳能这两项可再生能源在生活热水系统中的贡献率将达到 88.73%,该生活热水供应系统全年能效比高达 8.15。即使采用电辅助加热,系统全年能效比也可高达 2.52。

4.1.2 太阳能系统同时供应生活热水和采暖

表3给出了太阳能系统同时供应生活热水和采暖时的系统选型和运行模拟结果。在计算中作者将建筑南向坡屋面面积的 60%作为满布集热器后的系统集热器采光面积,以该采光面积为基础对系统进行模拟计算。系统采用间接系统,采暖和生活热水供水温度均为 50℃。

通过模拟计算可以看到,在以上集热器选型的基础上,太阳能系统采集到的能量占到了整个建筑采暖和生活热水能耗的 43%以上,在不考虑采暖时对生活热水负荷的太阳能保证率达到了 90%以上。如果采用后文所述的水平式地埋管系统辅助采暖,该生活热水和采暖系统年能效比高达 4.42。考虑到本工程的性质并不需要生活热水 100%的保证,为节省投资,在这种情况下不再考虑设置生活热水系统的辅助热源。

表 3 太阳能同时供生活热水和采暖时系统选型与模拟结果

南向斜屋顶可装集热器面积 (m ²)	集热器数量	集热器面积 m ²	年水泵耗电量 MWh	太阳能全年得热量 MWh	贮热水箱容积 m ³	有效贮热容积 m ³	生活热水全年需热量 MWh	采暖全年需热量 MWh	生活热水与采暖全年需热量 MWh	太阳能保证率 f
10743.51	5362	10724	74.84	4011.65	643.44	214.5	2872.23	6390.30	9262.53	43.31%

4.2 地埋管系统

在地源热泵系统的模拟计算中,作者以北京市空调采暖室外气象参数为基础,地下土壤按湿度较小的沙土考虑,土壤导热系数 0.9W/(m²℃),扩散率 5.16×10⁻⁷m²/s,密度 2000Kg/m³,热容 0.84KJ/(Kg℃)。地埋管热交换器管沟之间的间距按照 2.4 米计算,地源热泵机组制冷工况COP值设定为 4.5,制热工况机组COP值设定为 3.2。

表4给出了地埋管系统进行空调采暖时的系统选型和运行模拟结果。地埋管系统采用水平式系统。由于空调和采暖共用一套系统,而负荷各不相同,因此在系统选型时有按热负荷选型和按冷负荷选型两种方式。

表 4 采用地埋管系统时系统选型与模拟结果

年供热量需求 MWh	年供冷量需求 MWh	按热负荷选型					按冷负荷选型			
		所需地表面积 m ²	盘管长度 m	辅助散热装置散热功率 KW	耗电量 MWh		所需地表面积 m ²	盘管长度 m	耗电量 MWh	
					热	冷			热	冷
6390.30	13858.50	200572	222858	5548.9	2457.81	3745.54	315691	350769	2640.30	3944.30

对节能住宅来说,建筑热负荷明显小于冷负荷。从表4中可以看出,当按热负荷选型时,地埋管热交换器的散热能力不能满足冷负荷要求,需要额外增加辅助散热装置,如冷却塔等。当按冷负荷选型时,不仅在采暖季会造成部分地埋管热交换器的闲置,所占用的地表面积也要增大一倍以上,现场条件无法满足。因此,采用地埋管系统时,本项目按热负荷对地埋管热交换器进行选型,夏季利用辅助散热装置辅助散热,但为保证空调效果,地源热泵机组需要按照冷负荷选型。

通过模拟分析,按热负荷选型时地埋管系统的制热 COP 值为 2.6,即地热能可在采暖

能耗中的贡献率为 61.54%；制冷 COP 值为 3.7。

5 系统经济与节能分析

在以上选型和模拟的基础上，作者对系统的经济性和节能性进行了分析比较。对太阳能系统，重点分析了系统的初投资和回收年限；对地源热泵空调采暖系统，重点分析了系统的初投资和运行费用。最终就不同系统的节能性进行了分析和比较。

5.1 经济性分析

在进行经济分析时，预先设定如下：

- (1) 电价采用居民用电价格 0.48 元/kWh
- (2) 太阳能和地源热泵系统寿命定为十五年
- (3) 其他数据采用此次模拟计算数据
- (4) 太阳能集热器采用平板集热器

为方便比对，按照传统做法给出一个比对系统如下：

- (1) 生活热水采用电热水器，每户一台，单价 1000 元/台，使用寿命七年半
- (2) 采暖系统采用燃煤锅炉房+采暖散热器，初投资 100 元/m²，采暖费每年 16.5 元/m²，系统寿命十五年

- (3) 空调系统为房间空调器系统；三室两厅每户初投资 7000 元，二室两厅每户初投资 5000 元，一室两厅每户初投资 3000 元；使用寿命七年半；空调器平均 COP 为 2.6。

表 5 不同太阳能系统和地源热泵系统组合经济分析

系统	初投资		年生活热水运行费用		年采暖运行费用		年空调运行费用		年系统运行费用		全寿命费用	
	总投资(万元)	单位面积(元)	总费用(万元)	单位面积(元)	总费用(万元)	单位面积(元)	总费用(万元)	单位面积(元)	总费用(万元)	单位面积(元)	总费用(万元)	单位面积(元)
系统一	4432.49	330.49	58.99	4.40	123.87	9.24	188.78	14.08	371.64	27.71	10007.05	746.14
系统二	4752.51	354.35	17.96	1.34	123.87	9.24	188.78	14.08	330.60	24.65	9711.56	724.11
系统三	5405.17	403.02	5.44	0.41	100.18	7.47	188.78	14.08	294.40	21.95	9821.16	732.28
对比系统	3177.98	236.95	137.87	10.28	221.29	16.50	255.85	19.08	615.01	45.86	12403.13	924.79

注：系统 1：太阳能仅供建筑生活热水，电辅助加热；水平式地埋管系统空调采暖

系统 2：太阳能仅供建筑生活热水，水平式地埋管系统辅助加热；水平式地埋管系统空调采暖

系统 3：太阳能供建筑生活热水和采暖；水平式地埋管系统空调采暖

我们将不同的太阳能系统和地源热泵系统进行组合，将以上经济分析总结到表 5 中。从表中可以看出，对比系统虽然初投资较低，但在整个寿命期限内它所需要付出的费用要比利用可再生能源的系统高出 2500 万元左右。可再生能源系统中，由于系统三初投资较高，其全寿命费用略高于系统二，系统一全寿命费用最高。

从分析过程中，还可以得到以下结论：

(1) 太阳能系统仅供应建筑生活热水时，从所增加的初投资和投资回收年限来看，采用电作为辅助热源具有优势，但从系统的全寿命来看，假设系统寿命为 15 年，全寿命期内采用电辅助热源获得的收益是 803.83 万元，地埋管系统辅助热源获得的收益是 1093.54 万元，采用地埋管系统作为辅助热源具有绝对优势。

(2) 太阳能系统同时供应建筑生活热水和采暖时，同样以电热水器为参照，虽然系统初投资增加很多，但获得的太阳得热也随之增加，全寿命期内（15 年）系统可以获得 911.80 万元的收益。

(3) 采用地埋管系统空调采暖时，虽然地埋管系统的投资费用较高，但一方面它同时具备空调和采暖的功能，另一方面每年每平方米采暖费平均只有 9.24 元，如果采用太阳能采暖的话，采暖费可以降低到 7.47 元，而即使采用燃煤锅炉按现行收费标准每平方米也要 16.5 元，高出了地埋管系统一倍左右。如果采用高效地源热泵机组的话，运行费用还将进一步降低。

5.2 节能性分析

在空调工况下，与对比系统比较，本文提出系统的节能性主要体现在地源热泵机组和房间空调器机组能效比的差异上，本文不作重点分析。本文将系统在供暖和生活热水供应时每年利用的太阳能和地热能进行了计算，计算结果汇总见表 6 所示。

表 6 不同系统节能分析

系统	热水采暖年利用可再生能源量 MWh				热水采暖系统能效比
	太阳能	地热能	合计	折合标煤 (吨)	
系统一	1734.36	3932.49	5666.85	696.27	2.55
系统二	1734.36	4746.56	6480.92	796.29	3.29
系统三	4011.65	3231.31	7242.96	889.92	4.42
对比系统	0.00	0.00	0.00	0.00	/

从表中可以看出，采用太阳能和地源热泵系统后，每年利用的太阳能和地热能折合到标准煤 700—900 吨不等，其中以系统三的节能效果最为显著。

6 结论

通过对北京郊区某新农村住宅建设项目应用太阳能和地源热泵系统来供暖空调并提供生活热水方案的研究，作者得到以下结论：

- (1) 北京地区的新农村建设项目具有良好的可再生能源利用潜力，可以大力推广太阳能和地热能等可再生能源的利用。
- (2) 太阳能系统和地源热泵系统具有良好的技术性和经济性，各系统可独立设置，也可组合起来综合利用，增加的初投资在系统寿命内都可以得到回收。
- (3) 就本文研究的项目而言，从节能和全寿命费用角度综合来看，太阳能供建筑生活热水和采暖；水平式地埋管系统空调采暖系统具有最佳效果，是推荐实施的方案；从降低一次初投资出发，也可采用太阳能仅供建筑生活热水，电辅助加热；水平式地埋管系统空调采暖的系统方案，其一次初投资比系统三可以降低 1000 万左右。
- (4) 如果项目要求较低，不需要考虑空调，也可以在项目中单纯应用太阳能供热（热水+采暖）系统，利用薪材炉或煤炉作为系统的辅助热源，解决农村居住建筑的生活热水供应和采暖问题。