

文章编号: 1671-6612 (2023) 04-598-06

# 西安某幼儿园 空气源热泵耦合谷电蓄热供暖方案设计

丛惠<sup>1</sup> 王秀<sup>2</sup> 寇凡<sup>1</sup> 张振鹏<sup>2</sup>

(1. 西安市建筑设计研究院有限公司 西安 710054;

2. 西安工程大学 西安 710699)

**【摘要】** 将常规供暖系统与谷电供暖系统进行经济性和环保性对比, 分析若干供暖系统的初投资、年度运行费用以及进行费用年值和投资回收期在经济性比较, 结果表明: 空气源热泵耦合谷电供暖系统不仅具有节能减排、经济环保的特点, 而且还起到了削峰填谷的作用。结合项目具体要求, 最终确定西安某幼儿园具体供暖方案, 并介绍此方案的工作过程以及相变蓄热装置的选用依据, 为利用谷电蓄热供暖设计提供参考。

**【关键词】** 空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统; 削峰填谷; 经济环保

中图分类号 TU832.1+9 文献标识码 A

## Design of Air Source Heat Pump Coupled Valley Electric Heat Storage Heating Scheme for a Kindergarten in Xi'an

Cong Hui<sup>1</sup> Wang Xiu<sup>2</sup> Kou Fan<sup>1</sup> Zhang Zhenpeng<sup>2</sup>

(1. Xi'an Architectural Design and Research Institute Limited company, Xi'an, 710054;

2. Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710699)

**【Abstract】** The conventional heating system and the valley electric heating system are compared in terms of economy and environmental protection, and the initial investment, annual operating cost and annual cost value of several heating systems are analyzed. The results show that the air source heat pump coupled valley electric heating system has the characteristics of energy saving and emission reduction, economy and environmental protection, and plays the role of peak cutting and valley filling. According to the specific requirements of the project, the specific heating scheme of a kindergarten in Xi'an is determined, and the working process of this scheme and the selection basis of phase change heat storage device are introduced, so as to provide reference for the use of valley electricity heat storage heating.

**【Keywords】** Air source heat pump coupling valley electric heat storage heating system; Peak cutting and valley filling; Economic and environmental protection

## 0 引言

建筑能耗占我国能源消耗30%~40%, 而制冷和供暖能耗又占到建筑能耗的40%以上<sup>[1]</sup>, 因此如果可以对建筑供暖进行储热调峰, 对稳定和平衡国家电网系统压力具有重大意义。同时在工业和商业

建筑中, 峰谷电价差十分明显, 如果可以对建筑供暖进行谷电储热, 那么对建筑物业也会产生巨大的经济价值, 形成电网和用户双赢的局面。

目前, 我国严寒及寒冷地区冬季的供暖方式主要包括燃气锅炉、市政供暖、直接电供暖、空气源

作者(通讯作者)简介: 丛惠(1985-), 女, 硕士, 高级工程师, E-mail: 17653067@qq.com

收稿日期: 2023-02-13

热泵、地源热泵等。受环境治理的压力,部分中小型燃煤锅炉正在被燃气锅炉替代改成燃气锅炉,由于天然气成本较高,使得供热运行成本大幅度上涨,同时天然气供暖具有一定的安全隐患。除此之外,燃气供暖对城市的基础设施依赖度大,燃气气源、管网的不平衡等因素对燃气供暖制约很大<sup>[2]</sup>。同时市政供暖大部分是集成的燃气热水锅炉,或者是城市周边的热电厂提供余热,因而受到供热管道和热源供热能力的限制,近年来受到城市迅速扩张的压力,市政供热管网建设及供热能力已不能满足实际供热需求<sup>[3]</sup>。直接电供暖有着运行成本高的缺点<sup>[4]</sup>。单一空气源热泵受使用效果和机组功率的影响,目前大多适用于北方农村等对供暖要求较低的地区<sup>[5]</sup>。虽然地源热泵运行成本较低,但其初投资非常高、建设工程量大,而且无法对既有建筑进行改造,因此一般较少利用地源热泵供暖<sup>[5]</sup>。

谷电蓄热技术在用电低谷时段把电能转化为热能储存,有利于缓解电力峰谷差,起到节能作用,还可降低城市的集中锅炉房排放污染,并且在实行峰谷电价分计的地区可节约运行费用。将空气源热泵与谷电蓄热技术相结合,使供暖用户热源得以实现时空能效的转移,最大化获得空气能的利用时间,从而增加了系统的可靠性,提高了能源利用效率,降低了建筑能耗和城市的燃煤污染,达到了节能环保目的。是可以被市场长期选择的一种新型清洁供暖方式。

## 1 工程项目介绍

西安市航天产业基地某幼儿园项目,地上三层,地下一层,项目总建筑面积为3670m<sup>2</sup>,建筑高度12.6m,人视效果图如图1所示。冬季逐时供暖最

大总负荷101.4kW,计算热指标为55W/m<sup>2</sup>,供暖室外计算温度为-3.4℃,建筑内供暖时间为工作日的8:00-18:00,共10个小时,仅在工作时间对建筑进行供暖,供暖季供热天数为120天,供暖季热负荷系数取值为0.7,供暖全年耗热量138600kWh。



图1 西安市航天产业基地某幼儿园项目人视效果图

Fig.1 Visual renderings of a kindergarten project in Xi'an Aerospace Industry Base

## 2 系统的确定

对市政集中供热、分布式天然气热水锅炉、分布式燃气锅炉、电热水锅炉、空气源热泵、空气源热泵耦合谷电蓄热六种供暖方式进行经济性和环保性比较分析,再结合客户需求,确定该幼儿园项目的供暖设计方案。

### 2.1 经济性分析

#### 2.1.1 项目建设初投资

供暖系统初投资包括热源设备费用、管道配件费、设备安装费等,所有供暖系统水泵均供用“两用一备”原则;管道配件和设备安装费用供用水泵的7%、5%和4%<sup>[6-8]</sup>。经计算,各供暖形式初投资费用如表1所示。

表1 各供暖形式初投资费用表

Table 1 Initial investment cost of each heating form

供暖方式	费用明细(元)	合计(元)
市政集中供热	换热站设备: 260000; 水泵费用: 3000; 管道配件: 18200; 设备安装: 13000;	294200
分布式天然气热水锅炉	天然气锅炉: 213000; 水泵费用: 3000; 管道配件: 14910; 设备安装: 10650;	241560
分布式燃煤锅炉	燃煤锅炉: 200000; 水泵费用: 3000; 管道配件: 14000; 设备安装: 10000;	227000
电热水锅炉	电锅炉: 200000; 水泵费用: 3000; 管道配件: 14000; 设备安装: 10000;	227000
空气源热泵	热泵机组: 480000; 水泵费用: 3000; 管道配件: 33600; 设备安装: 24000;	540600
空气源热泵耦合谷电蓄热	热泵机组: 208400; 相变储热装置: 109000; 水泵费用: 3000; 管道配件: 8336; 设备安装: 7294;	411280

2.1.2 供暖全年费用

系统具体年度运行费用明细<sup>[9]</sup>如表3所示。

计算不同供暖系统的供暖全年费用。不同供暖

表2 各供暖形式供暖全年费用表

Table 2 Annual costs for each form of heating

	市政集中 供热	分布式天然气 热水锅炉	分布式 燃煤锅炉	电热水锅炉	空气源热泵	空气源热泵 耦合谷电蓄热
供热面 (m <sup>2</sup> )	3000	3000	3000	3000	3000	3000
供热负荷 (W)	165000	165000	165000	165000	165000	165000
供暖全年耗热量 (kWh)	138600	138600	138600	138600	138600	138600
热效率	1.00	0.93	0.70	0.98	0.85	0.96
燃料热值	\	8600Kcal/Nm <sup>2</sup>	5000Kcal/kg	860Kcal/kWh	860Kcal/kWh	860Kcal/kWh
价格	7.5元/m <sup>2</sup> /月	3.0元/Nm <sup>2</sup>	0.9元/kg	平均0.71元/kWh	平均0.71元/kWh	谷电0.3125元/kWh
供暖季燃料消耗量	\	17329	39600	164452	189603	167878
供暖全年费用	90000	51988	35640	116761	134618	524612

注：其中，陕西省工商业谷电价格为0.3125元/kWh；平电0.71元/kWh；峰电1.05元/kWh，其余价格根据民用物价局限价标准所定。

供热负荷=供热面积×热指标

供暖全年耗热量=供热负荷×供暖季天数×每天小时数×供暖季热负荷系数/1000

供暖季燃料消耗量=供暖全年耗热量/热效率/燃料热值×1000

供暖全年费用=价格×供暖季燃料消耗量

2.1.3 年度运行费用  
供暖系统年度运行费用包括能源消耗费（供暖 [10-12]。不同供暖系统具体年度运行费用明细如表3 全年费用）、设备折旧费、设备维护费和管理费等 所示。

表3 各供暖系统具体年度运行费用明细

Table 3 Detailed annual operating costs of each heating system

供暖方式	供暖全年 费用 (元)	设备折旧费 (系 统初投资的 <i>r</i> %)	设备维护费 (设 备折旧费的 <i>e</i> %)	管理费 (工人人数× 日工资×供暖天数)	年度运行费用
市政集中供热	90000	<i>r</i> =5	<i>e</i> =3	28800	142336
分布式天然气热水锅炉	51988	<i>r</i> =5	<i>e</i> =4	28800	99504
分布式燃煤锅炉	35640	<i>r</i> =10	<i>e</i> =5	28800	98490
电热水锅炉	116761	<i>r</i> =5	<i>e</i> =4	12000	149191
空气源热泵	134618	<i>r</i> =3	<i>e</i> =3	12000	179054
空气源热泵耦合谷电蓄热	524612	<i>r</i> =3	<i>e</i> =3	12000	84444

将该项目的不同供暖系统方案的供暖全年费用、初投资、年度运行费用以及投资额进行对比，如图2所示。

从图2可以看出，针对该项目，初投资最高的是空气源热泵供暖系统，约为54万元。电热水锅炉、集中供热、燃煤锅炉、天然气锅炉供暖系统的初投资较低。最低的为电热水锅炉、燃煤锅炉。从年运行费用来看，费用最高的是空气源热泵，达到17.9

万元，最低为空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统，约为8.4万元，仅为最高的47%。从采暖全年费用来看，最低的为燃煤锅炉系统，但燃煤锅炉的供暖效率低，造成能源浪费，以及燃煤产生的有害物质极大的污染空气，影响人体健康。除燃煤锅炉之外，空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统和分布式天然气热水锅炉供暖全年费用最低，低于最高的空气源热泵供暖系统约8万元。虽然分布式天然气热水锅

炉供暖系统的年度运行费用和供暖全年费用不是最高的,但其实际运行费用与天然气价格季节波动直接相关,使用时应对比运行费用和参考国家环保动向选择。从投资额来看,空气源热泵投资额最高,其余供暖系统的投资大径相庭,差距不大。通过对比可知空气源热泵供暖系统经济性较差,而空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统的运行经济性较好,此外该系统的蓄热装置在运行过程中起到了电力削峰填谷的作用,缓解了弃电、谷电问题,因此,空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统具有较大的发展优势。

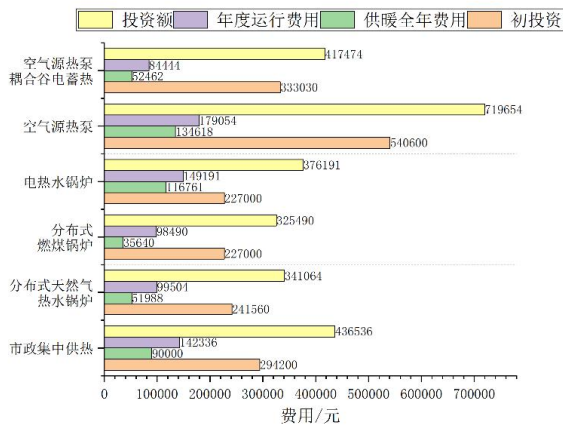


图2 供暖系统投资额、年度运行费用、供暖全年费用、初投资对比图

Fig.2 Comparison chart of heating system investment, annual operating costs, heating year-round costs and initial investment

2.2 经济性评价

用费用年值法及投资回收期对该项目的不同供暖系统进行经济性评价分析。

2.2.1 费用年值法经济性评价

将不同设计方案的初投资与年运行成本折算成与其等值的各年年末等额成本,计算得到的费用年值越小,经济性越好。计算结果如图3所示。

$$AC = \left[ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] C_i + C_k \quad (1)$$

其中:  $AC$ 为费用年值,元;  $i$ 为标准收益率,本文取8%;  $N$ 为设备使用年限,20年<sup>[13]</sup>;  $C_i$ 为初投资,元;  $C_k$ 为年运行费用,元。

2.2.2 投资回收期经济性评价

相比静态投资回收期法,动态投资回收期法考

虑了货币价值,能更加精准的评价系统的投资回收期,反应经济效益。计算模型如式(2)所示,计算结果如图3所示。

$$T = t + \frac{\left( A - \sum_{i=1}^t B_i \right)}{B_{(t+1)}} \quad (2)$$

其中:  $B_i$ 为第*i*年的收益;  $T$ 为自投产时起收益累加值最接近投资额的年份数;  $A$ 为投资额。根据民用物价局限价标准,10000m<sup>2</sup>商业建筑以7.5元收费。

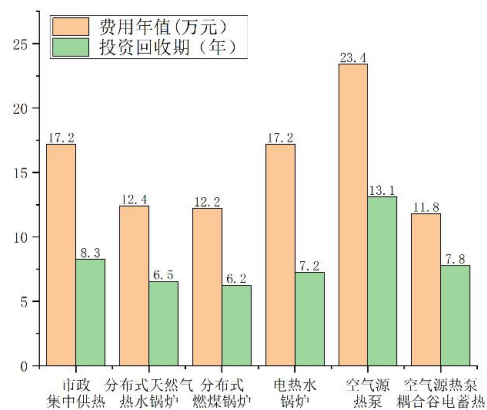


图3 供暖系统的费用年值和投资回收期对比图

Fig.3 Comparison of annual values of costs and payback periods for heating systems

由图3可知空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统的费用年值最低,低于最高的单独空气源热泵供暖系统约11万元,在投资回收期方面略高于分布式燃煤锅炉、电热水锅炉和分布式燃煤锅炉供暖系统,低于最高的空气源热泵供暖系统约5年,从而推得空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统经济性较好。

通过对各种不同供暖系统的经济性环保性方面进行对比,结果表明:虽然空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统初投资相对较高,但其年度运行费用、供暖全年费用以及费用年值相对较低,且投资回收期年限较短,表明空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统经济性较好,其冷热源来源于周围环境中的空气能,对电力的使用只占据系统运行过程中很少的一部分,这使得在运行过程中产生很少的废气等污染物。因此空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统增加了系统的可靠性,提高了能源利用效率,降低了建筑能耗和城市的燃煤污染,达到了节能环保目的。再结合西安市某幼儿园项目既要满足夏季供

冷,又要满足冬季供热的要求,最终确定该项目选用空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统。

### 3 项目具体实施方案

西安某航天产业基地供用空气源热泵耦合谷电蓄热供暖方式进行供暖。该系统中,热量输配管网分为三个环路,分别为空气源热泵—相变蓄热装置蓄热环路、空气源热泵直接供暖环路和储热装置释热供暖环路。三个环路设置为共用水泵,并按照两用一备的模式进行选型设计。按照环路的总水头损失和流量,并增加10%~15%的富余量,确定水泵的扬程与流量。地辐热系统升温速度较慢,一般需要3~4个小时才能达到理想温度、是耗能较高的供暖方式。因此,安装地辐热系统一般都是整个供暖季持续供热,不适用间歇供暖,不适合办公楼、幼儿园等公共场所安装。又由于本系统供用空气源热泵作为热源,其供回水温度达不到散热器的供回水温度要求,因此本项目选用风机盘管作为末端装置。

#### 3.1 空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统的工作过程

耦合空气源热泵的谷电蓄热供暖系统主要由空气源热泵、蓄热装置、分水器、集水器、输配管线及空调末端(风机盘管)构成。系统工作流程如图3所示。

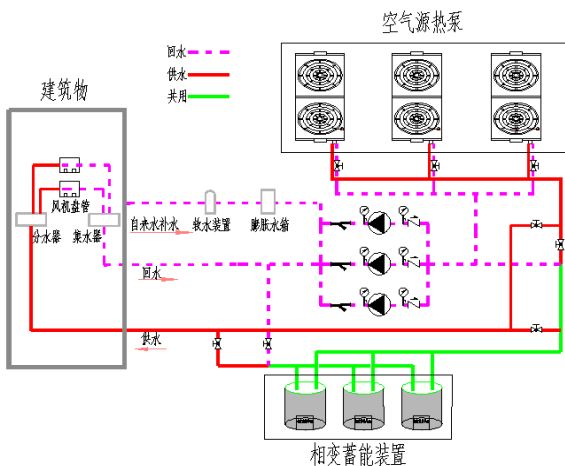


图4 空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统流程图

Fig.4 Working flow chart Air source heat pump coupled valley electric heat storage heating system

空气源热泵制取的热量,一方面通过输配系统将热量供给末端用户,另一方面供给到相变蓄热装

置。其工作模式有4种,具体如下:

#### (1) 空气源热泵制冷

此工作模式运用于供冷季,该系统为常规的空气源热泵制冷系统。空气源热泵制取的冷负荷,通过输配管网将制冷量共给到末端用户,制冷量输送如下:



#### (2) 蓄热装置蓄热

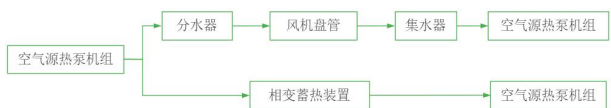
此工作模式运用于供暖季,在此工作模式下,空气源热泵直接对相变蓄热装置进行蓄热。空气源热泵制取的热量,通过输配管网将热量供给到相变蓄热装置,当相变蓄热装置蓄热量达到最大容量时,蓄热过程结束,热量输送路线如下:



此运行模式适用于谷价电的情况。具体而言,谷价电且末端用户没有供暖需求时,空气源热泵供暖运行费用较低,因而对相变蓄热装置进行蓄热,达到削峰填谷的目的。

#### (3) 空气源热泵供暖+蓄热装置蓄热

此工作模式运用于供暖季,在此工作模式下,空气源热泵不仅向供暖末端进行供暖,同时对相变蓄热装置进行蓄热。空气源热泵制取的热量,一部分供给给相变蓄热装置,另一部分通过输配管网供给到末端用户,满足供暖需求,热量输送路线如下:



此工作模式在需要在谷价电供暖的情况。具体而言,谷价电时,电价较低,在满足末端供暖需求的基础上,将多余热量存储于相变蓄热装置中,储存的热量可供峰价电时使用,实现空气源热泵高效能比的时空转移和峰谷电价的经济性。

#### (4) 蓄热装置释热

此工作模式运用于供暖季,在此工作模式下,相变蓄热装置已提前完成蓄热,进而直接向末端进行供暖。热量从相变蓄热装置中取出,通过输配管网供给到末端用户,热量输送路线如下:



此运行模式适用于峰价电的情况。具体而言,峰价电且末端用户有供暖需求时,空气源热泵供暖运行费用较高,因而提取相变蓄热装置中的热量,实现低成本运行,达到经济环保的目的。

### 3.2 相变蓄热装置选用依据

相变蓄热装置基于模块化和多管路设计,模块基体为骨架-空隙结构,骨架-空隙结构吸附有相变蓄热材料构成的长方体相变蓄热单元。相变蓄热单元供用纳米级相变材料,具有安全环保、蓄热密度大、使用寿命长等特点,可以有效提升换热效率。

相变蓄热单元的数量计算原则是相变蓄热装置最大热容量足以提供峰价电末端用户的热量需求。相变蓄热单元具体参数如表4所示。根据耦合空气源热泵的谷电蓄热供暖系统的服务对象,相变蓄热装置至少需要满足一个工作日内工作时间内末端用户的热量需求。相变蓄热装置选用计算式为:

$$n = \frac{Q \times t}{q} = \frac{101.4 \times 10}{110} \approx 9.2 \quad (3)$$

其中,  $n$  为相变蓄热单元个数;  $Q$  为逐时最大热负荷, kW;  $t$  为工作时间, h;  $q$  为相变蓄热单元最大热容量, kWh。

表4 相变蓄热单元参数表

Table 4 Phase change heat storage unit parameter table

项目	数值
蓄热量 (kWh)	110
循环温度 (°C)	55
设计/工作压力 (MPa)	1.0
额定放热功率 (kW)	28
重量 (t)	2.2
产品外形尺寸 (mm)	1000×1000×2000
供暖面积 (m <sup>2</sup> )	400-600

考虑实际情况,最终使用标准工况下(-12/-14°C)制热量110kW的低温空气源热泵3台,蓄热量110kWh相变蓄热单元10台。

## 4 小结

空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统不仅利用了可再生能源-空气能,还利用了相变蓄热技术,既可以节能减排,又达到了削峰填谷、缓解电网负荷的效果,此外,此系统的使用还可以产生一定的经济效益。

通过对各种不同供暖系统的经济性环保性方面进行对比,结果表明:虽然谷电蓄热供暖系统初

投资较高,但其年度运行费用、供暖全年费用以及费用年值相对较低,且投资回收期较短,表明此系统经济性较好,而且此系统提高了能源利用效率,争取最大化的节能,降低了建筑能耗和城市的燃煤污染,对实现建筑行业绿色节能起到积极作用,满足经济社会高质量发展的需要,是可以被市场长期选择的一种新型清洁供暖方式。

当项目在一套系统中既需要满足夏季制冷和冬季制热的需求,又有条件利用谷电蓄热供暖时,空气源热泵耦合谷电蓄热供暖系统是一种性价比较高且节能环保的供暖方式。

### 参考文献:

- [1] 付祺.我国建筑能耗状况及有效的节能途径[J].建筑技术开发,2017,44(1):150-151.
- [2] 唐戎,张杨竣,王启,等.燃气供暖热水炉2020年中国市场统计分析[J].煤气与热力,2021,41(10):32-34,43.
- [3] 潘玉亮,高彩凤.严寒地区超低能耗居住建筑供暖系统对比分析[J].建筑节能(中英文),2022,50(5):48-52.
- [4] 陈英泉.电采暖组群计算机控制系统技术创新[J].建设科技,2006,(24):52-53.
- [5] 张朝晖,王若楠,高钰,等.热泵技术的应用现状与发展前景[J].制冷与空调,2018,18(1):1-8.
- [6] 罗家松.北京市电供暖经济可行性和可持续发展研究[J].电力需求侧管理,2019,21(2):51-55.
- [7] 任春立,温翠玲,刘赞,等.集中供热计量收费及系统节能分析[J].建筑节能,2018,46(11):119-122,125.
- [8] 田芳.太阳能-空气双热源热泵系统在寒冷地区供热性能的研究[D].南京:南京理工大学,2018.
- [9] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [10] 谭忠富,姜海洋,严菲.我国电力用煤效率分析及改进措施[J].中国能源,2008,(1):35-38.
- [11] 王春兰,许诚,徐钢,等.京津冀地区天然气和热泵替代燃煤供暖研究[J].中国环境科学,2017,37(11):4363-4370.
- [12] 王洋涛.空气源热泵及辅助电加热复合采暖系统耦合优化[D].太原:太原理工大学,2019.
- [13] 姚文涛.供水大厦空调冷热源方案比较[D].西安:西安建筑科技大学,2004.