

文章编号: 1671-6612 (2019) 01-006-5

高寒地区槽式太阳能集热器 与 CO₂ 热泵复合采暖系统的优化研究

何璇 雷波

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 对拉林线车辆整备库的槽式太阳能集热器与 CO₂ 热泵复合采暖系统, 利用 TRNSYS 软件建立仿真平台, 分析集热器面积、集热器聚光比、单位集热面积水箱容积与热泵设计容量等设计参数对复合采暖系统性能的影响, 采用正交试验法, 以综合评价指标 CEI 为目标优化设计参数, 优化结果对高寒地区同类供暖工程参数的确定有参考意义。

【关键词】 高寒地区; 槽式太阳能集热器; CO₂ 空气源热泵; 设计参数优化

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Optimization Research of Combining Parabolic Trough Collectors and CO₂ Air-source Heat Pump Heating System in Alpine Region

He Xuan Lei Bo

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 In this paper, relied on a preparation workshop for railway station building in Larin, the simulation model of the parabolic trough collectors and CO₂ heat pump combined heating system was based on the platform of TRNSYS. Found out the influence of solar collector area, concentration ration, storage tank volume of per unit collector area and the capacity of heat pump on the system performance. Used orthogonal experimental design method and taked comprehensive evaluation index (CEI) as objective functions to optimize system parameters. The results had reference value for analyzing and determining design parameters of similar engineering in alpine region.

【Keywords】 Alpine region; parabolic trough collectors; CO₂ heat pump; optimal research on design parameters

0 引言

我国高寒地区矿物能源严重短缺, 可再生能源丰富, 尤其是太阳能资源, 作为一种清洁无污染的能源, 太阳能对减少常规能源消耗和空气污染具有显著意义。拉萨素有“日光城”之称, 全年累计太阳辐射量高达 7.2GJ/m², 使得采用太阳能采暖成为当地自然的选择^[1], 因此, 本文以拉萨地区为背景, 进行太阳能采暖系统的研究。

目前, 用于太阳能采暖的集热器有平板型集热

器、真管式集热器及槽式太阳能集热器。常规集热器在寒区地区使用时存在效率低、难防冻、易过热等^[2]问题, 真空管式集热器还存在爆管问题, 而槽式太阳能集热器运行安全可靠, 冬季无需防冻, 夏季无过热问题, 集热效率高, 所需面积仅为常规集热器的 20~40%^[3], 可作为中大型建筑采暖系统的主要热源。槽式太阳能集热器的应用较为广泛, 目前大都集中在发电、制冷及冷热电三联供系统的研究, 对应用于采暖系统的研究较少。邹斌^[2]提出了

作者简介: 何璇 (1992.02-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 13540109164@163.com

通讯作者: 雷波 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: lbswjtu@163.com

收稿日期: 2018-04-26

严寒地区槽式太阳能集热器与燃气锅炉复合供暖系统,分析系统运行特性,并进行参数优化;Evangelos^[3]等建立了太阳能与吸收式热泵联合运行的系统,对比采用不同集热器进行采暖时系统的性能,结果表明槽式集热系统效率最高;王刚^[4]对西藏那曲采用槽式集热器和相变蓄能器采暖进行研究,从集热器面积、蓄能方式、蓄能器蓄能量等方面阐述了系统设计思路与计算过程。

本文选用槽式太阳能集热器进行高寒地区太阳能采暖的研究,以CO₂热泵作为辅助热源,构建槽式太阳能集热器与CO₂空气源热泵复合采暖系统(简称复合采暖系统),以拉林线车辆整备库为例,分析关键设计参数对复合采暖系统性能的影响,并进行参数的优化。

1 复合采暖系统结构

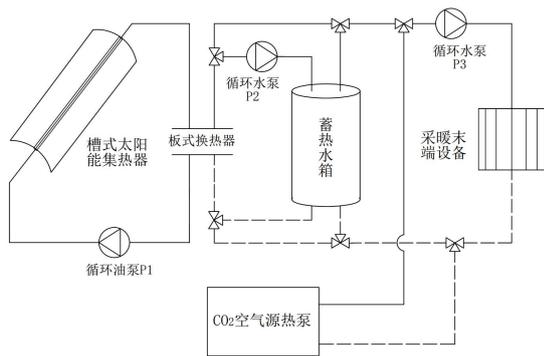


图1 复合采暖系统原理图

Fig.1 Schematic of the combined heating system

图1为复合采暖系统的原理图,系统由集热系统与供热系统组成。集热系统由集热器与板式换热器组成,供热系统由蓄热水箱、热泵机组及末端装置组成,管路中的载热工质分别为导热油和水,整个系统通过油-水板式换热器实现两系统之间的连接及热量传递。该复合采暖系统的供暖方式包括三种:太阳能直接供热模式、蓄热水箱供热模式及CO₂热泵供热模式,优先利用太阳能或水箱进行供热,尽量少开启CO₂空气源热泵机组。

2 复合采暖系统性能的影响因素分析

2.1 建筑模型

选取拉林线车辆整备库作为本文的研究对象,其建筑面积为18963m²,属于大空间建筑。拉萨市

的采暖时间为11月1日到次年3月12日,室内设计温度为18℃,采用EnergyPlus软件计算建筑负荷,得到建筑采暖设计负荷为3285kW,采暖季总耗热量为4.63×10⁶MJ。采暖供回水温度为70/50℃。

2.2 评价指标

表1 平板集热器与CO₂热泵复合采暖系统的性能参数

Table 1 Performance parameters of flat plate collectors and CO₂ heat pump combined heating system

基准系统参数	
集热器面积/m ²	5115
水箱容积(L/m ²)	70
热泵容量/kW	3450
费用现值/万元	2144.7
系统耗电量/kWh	321825
太阳能保证率/%	50

槽式太阳能集热器与CO₂热泵复合采暖系统有明显的节能优势,本文从节能性和经济性方面对系统进行综合分析。建立基于一次能源节约率PESR与费用现值节省率CSR^[6]的综合评价指标CEI,如公式(1)。

$$CEI = \alpha PESR + \beta CSR = 1 - \left(\alpha \frac{E_{grid}}{E_{grid0}} + \beta \frac{PC}{PC_0} \right) \quad (1)$$

式中, E_{grid} , E_{grid0} 为复合采暖系统与基准系统耗电量, kWh; α , β 为指标权重,系统节能性及经济性同等重要时,均赋予0.5; PC , PC_0 为系统费用现值,万元,包括初投资 IC 、维护费用 RC 与运行费用 EC ,公式如下:

$$PC = (RC + EC) \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + IC \quad (2)$$

式中, i 为基准折现率,8.5%^[7]; n 为系统设备寿命年限,取20年; IC 为系统初投资,包括热源系统、输送系统及末端系统的费用,公式^[5,6]如下:

$$IC = P_A A_c + 1000V_w + 2500Q_e + (55 + 45.8)A_0 \quad (3)$$

式中, A_c 为槽式集热器面积, m²; V_w 为水箱容积, m³; Q_e 为热泵设计容量, kW; A_0 为建筑面积 m²; P_A 为槽式集热器的成本,元/m²,根据现有的集热器价格,拟合集热器价格与集热器聚光比的

关系如下:

$$P_A = 2539.912 - 1632.546 \times e^{(-Cr/25.331)} \quad (4)$$

采用平板型集热器与 CO₂ 热泵复合采暖系统作为系统评价的基准系统,根据建筑设计负荷确定系统设备参数,如表 1。

2.3 系统性能的影响因素分析

基于 TRNSYS 建立的复合采暖系统仿真平台,采用单因素试验法分析系统关键设计参数对系统性能的影响规律。

(1) 集热器面积

图 2 为集热器面积 A_c 变化时系统太阳能保证率和 CEI 的变化规律,从中可以看出,当集热器面积增加时,太阳能保证率增大且趋于平缓,集热器面积在 375~2910m² 范围内变化时,太阳能保证率增加了 51.3%,集热器面积增加使得系统初投资增加,运行费用减少,CEI 随之先增加后减小,集热器面积处于某一个范围内时,CEI 大于零,当集热器面积为 2550m² 时,CEI 取得最大值,为 8.0%,相比集热器面积为 375m² 时,CEI 增加了 29.4%。

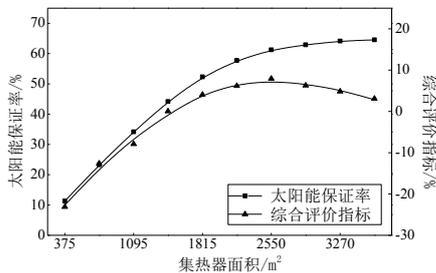


图 2 集热器面积的影响分析

Fig.2 Impact analysis of solar collector area

(2) 集热器聚光比

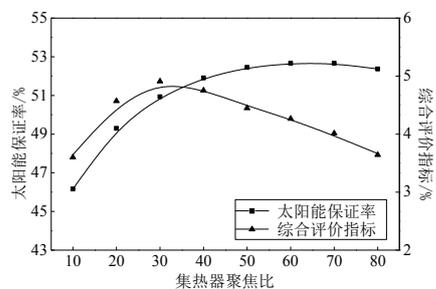


图 3 集热器聚光比的影响分析

Fig.3 Impact analysis of concentration ration

图 3 给出了采暖系统太阳能保证率和 CEI 随集

热器聚光比 Cr 的变化情况,从中可以看出,随着聚光比的增大,太阳能保证率增大且趋于平缓,之后小幅度下降,聚光比在 10~60 的范围内变化时,太阳保证率增加了 6.5%,CEI 随聚光比的增加先增加后减小,在聚光比为 30 时取到最大值,CEI 为 4.9%,相比聚光比为 10,CEI 增加了 1.3%。

(3) 单位集热面积水箱容积

图 4 是单位集热面积水箱容积 Var 不同时系统的太阳能保证率和 CEI,从中可以看出,随着单位集热面积水箱容积 Var 的增大,太阳能保证率与 CEI 先增大后减小,当单位集热面积水箱容积为 120L/m² 时取得最大值,太阳能保证率为 54.1%,CEI 为 5.6%,水箱容积 Var 在 50~120L/m² 范围内变化时,太阳保证率增加了 17.3%,系统的 CEI 增加了 14.4%。

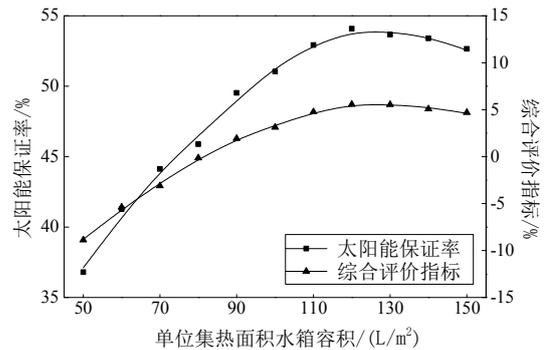


图 4 单位集热面积水箱容积的影响分析

Fig.4 Impact analysis of storage tank volume of per unit collector area

(4) 热泵设计容量

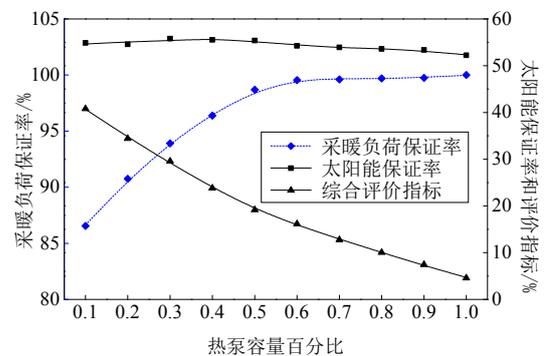


图 5 热泵设计容量的影响分析

Fig.5 Impact analysis of the capacity of heat pump

将热泵设计容量 Q 按照名义制热量 3250kW 的

10~100%进行仿真,如图 5,随着热泵容量的增大,太阳能保证率几乎不受影响,采暖负荷保证率增大且趋于平缓,当热泵容量为 50%的容量时,负荷保证率大于 97%,系统的初投资和运行费用随热泵容量的增加而增加,CEI 随之单调递减,热泵容量在 50~100%的范围内变化时,负荷保证率仅增加了 1.3%,CEI 降低了 14.6%。

3 系统设计参数的显著性分析与优化

正交试验法可用于抓住影响指标的关键因素,也可以通过少量试验寻求最优水平。根据本文研究对象,选用 4 因素 3 水平系列的 L₉(3⁴)正交表,制定试验方案,经过极差分析确定设计参数影响的显著性;为了确定系统综合性能最佳的设计参数,以 CEI 为目标进行多次正交试验完成参数的优化,逐渐压缩水平步长,重新编制试验方案进行下一次正交试验,当满足试验终止条件时,得到系统的最佳设计参数,优化终止条件如下:

- (1) 各因素综合指标 CEI 极差满足 $R_{CEI} < 1\%$;
- (2) 试验水平步长不大于最小水平步长。

3.1 设计参数的显著性分析

分析各关键设计参数对系统性能影响的显著性,选择试验水平应在保证太阳能保证率不低于 50%的前提下,遵循“由小到大,保证最优”的原则,选取单因素试验分析中最优工况与较差工况,如表 2。

表 2 正交试验因素水平表

试验因素	1	2	3
A A_c/m^2	1815	2550	3630
B Cr	10	30	60
C $Var (L/m^3)$	50	80	120
D $Q/\%$	0.5	0.8	1.0

根据标准正交表确定各组试验组合,对各组合进行仿真计算,并进行极差分析,结果如表 3。

极差大小意味着各因素的水平改变时对试验指标的影响不同,极差越大表明该因素对指标的影响效果越显著。根据表 3,得到各因素对太阳能保证率的显著性为 $A_c > Var > Cr > Q$,对费用现值的显著性为 $Q > A_c > Cr > Var$ 。

从各因素不同水平下 κ 值,确定各因素最优的

水平, κ 值越大该水平越优,由此,可以得到就复合采暖系统以太阳能保证率或经济性为指标时各因素最优的水平,但所得到的结果不是综合经济性与节能性最佳的参数组合。

表 3 正交试验结果的极差分析

Table 3 Range analysis of orthogonal experiment results

因素	A	B	C	D	
太阳能保证率	$\kappa_1=K_1/3$	43.75	52.12	46.48	54.37
	$\kappa_2=K_2/3$	56.16	54.91	55.54	54.76
	$\kappa_3=K_3/3$	63.05	55.92	60.93	53.83
	R	19.29	3.80	14.45	0.93
费用现值节省率	$\kappa_1=K_1/3$	16.00	15.88	6.52	20.35
	$\kappa_2=K_2/3$	10.50	7.70	8.42	8.15
	$\kappa_3=K_3/3$	-0.10	2.82	11.46	-2.10
	R	16.10	13.06	4.94	22.45

3.2 设计参数的优化

(1) 设计参数的优化结果

经过六次正交试验,6×9 组代表性组合的仿真计算后,满足正交试验的终止条件,得到复合采暖系统最佳的设计参数,即集热器面积为 2685m²,集热器聚光比为 21.3,单位集热面积水箱容积为 126.3L/m²,热泵设计容量为 1466kW。

每次试验的优化结果与极差结果,如图 6、7。从图中可以看出,随着试验次数增多,优化结果不断接近系统的最佳参数组合,四次试验后系统各因素的优化结果趋于平缓,波动幅度小于初步取值的 3.0%,极差降低至 1.0%,可见,改变因素水平对指标的影响已不具有显著性,因此,以 CEI 为目标进行设计参数的优化,可适当减少试验次数,对于本文所研究的复合采暖系统,试验次数可控制在 3~4 次。

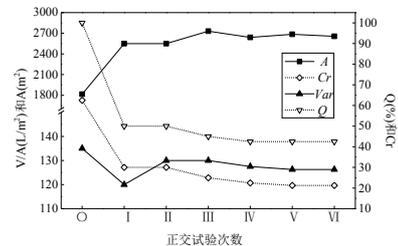


图 6 每次正交试验各因素的最优水平

Fig.6 The optimal level of each parameter for each orthogonal experiment

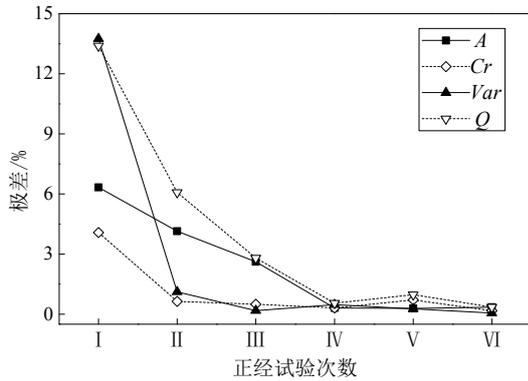


图7 每次正交试验各因素CEI的极差

Fig.7 The results of CEI in each orthogonal experiment

(2) 系统优化结果的综合分析

系统初步选型与优化后的设备参数与仿真结果,如表4所示。经过系统设计参数的优化,其太阳能保证率为63.6%,CEI为29.3%,相较于初步选型的结果,系统太阳能保证率提高了11.3%,费用现值减少了27.8%,耗电量减少了27.3%,CEI增加了25.2%,系统的供热能力提高、一次能源消耗量减少、系统经济性提升。

表4 复合采暖系统优化前后的性能参数

Table 4 Performance parameters of before and after optimization

	优化前	优化后
集热器面积/m ²	1815	2685
集热器聚光比	62.5	21.3
Var (L/m ²)	135.0	126.3
热泵容量/%	100.0	42.5
系统初投资/万元	1514.0	1084.1
运行+维护费用/万元	63.1	46.4
总费用现值/万元	2110.9	1523.3
系统耗电量/kWh	300810	226779
太阳能保证率/%	52.2	63.6
综合评价指标/%	4.1	29.3

最终,根据优化结果提出高寒地区同类供暖工程设计参数的推荐原则:集热器面积由太阳能保证率计算确定,集热器聚光比为21.3,单位集热面积水箱容积为126.3L/m²,热泵设计容量为名义容量的42.5%。

4 结论

本文通过对高寒地区的槽式太阳能集热器与CO₂热泵复合采暖系统的关键设计参数的分析与优化,最终得到以下结论:

(1) 分析各设计参数对复合采暖系统性能的影响,得到太阳能保证率及CEI随设计参数的变化规律;通过显著性分析,得到各设计参数对太阳能保证率的影响程度为 $A_c > Var > Cr > Q$,对系统费用现值的影响程度为 $Q > A_c > Cr > Var$;

(2) 以CEI为目标优化系统设计参数,得到了采暖系统的最佳参数组合,其太阳能保证率达到63.6%,CEI为29.3%,根据优化结果提出了高寒地区同类供暖工程设计参数的推荐原则;

(3) 在实际应用中,对本文建立的槽式太阳能集热器与CO₂热泵复合采暖系统的仿真平台,根据工程的系统结构与设备参数,调整仿真模型部件及参数,进行系统的相关参数与系统特性的研究。

参考文献:

- [1] 江亿,冯雅,戎向阳,等.对拉萨城市供暖模式的探讨[J].暖通空调,2013,43(6):1-7.
- [2] 邹斌.槽式太阳能集热器与燃气锅炉联合供暖系统模拟研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [3] 张昕宇.真空管型太阳能热水器与中温集热器热性能研究[D].天津:天津大学,2014.
- [4] Evangelos Bellos, Christos Tzivanidis, Kimon A. Antonopoulos Exergetic, energetic and financial evaluation of a solar driven absorption cooling system with various collector types[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,102:749-759.
- [5] 王刚.西藏自治区那曲地区申扎县太阳能供暖工程设计实例[J].暖通空调,2017,47(2):52-58.
- [6] 王少杰,涂光备,郑宗和,等.太阳能热水器容积与集热面积的合理配比的探讨[J].太阳能学报,2003,24(5):629.
- [7] 中国银行国际金融研究所.国际金融手册[M].北京:人民出版社,1990.
- [8] 侯化国,王玉民.正交试验法[M].吉林:吉林人民出版社,1985.