

文章编号: 2095—0411 (2012) 02—0054—04

空气源热泵热水系统的优化设计选择^{*}

郭 强, 付亚囡, 祝清杰

(常州大学 石油工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 空气源热泵热水供应是一种高效的建筑节能方式, 被广泛地应用于公共建筑卫生热水供应系统。研究了热泵机组的出水规律和用户的用水规律, 通过建立全寿命周期成本计算数学模型, 对不同名义制热量的热泵机组进行经济效果综合评价, 寻找最佳的技术经济点, 为设备选型与计算、储热水箱最佳容积的确定, 提供参考依据。

关键词: 空气源热泵; 建筑节能; 优化设计; 全寿命周期成本分析; 储热水箱容积

中图分类号: TK 8

文献标识码: A

Optimum Design on Air Source Heat Pump Water Heater

GUO Qiang, FU Ya—nan, ZHU Qing—jie

(School of Petroleum Engineering, Changzhou University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Air source heat pump hot water system is an efficient way of energy saving of buildings and is widely used in hot water supply system of commercial buildings. Heat pump units of pumping rule and daily maximum water—consumption were studied. The math model of life cycle cost analysis was established to estimate the economic assessment of different heat pump units and search for the optimal technical economy points. The results can provide references for the equipment selection and the determination of the best volume of hot water tank.

Key words: air source heat pump; building energy efficiency; optimization design; life cycle cost analysis; volume of hot water tank

随着我国城市化进程的加速、人们生活水平提高, 洗浴热水的用水量急剧增加, 加热洗浴热水的用能量迅速攀升。2002 年, 广州和上海生活热水洗澡用能已分别占到家庭生活用能的 19.1% 和 13.1%^[1], 各类公共建筑卫生热水能耗更占到总运行能耗的 20%—40%^[2]。由于空气源热泵热水机组具有显著的节能环保特性, 随着机组性能的不断完善, 在制备低品位热水方面具有很强的竞争力。在上海、苏州、广州、厦门、深圳经济发达地区, 政府的一些招标采购项目都已明确指定使用空气源

热泵热水器产品^[3]。在长江以南地区, 热泵热水器已逐步成为洗浴热水供应的主要热源形式之一。目前, 在空气源热泵热水系统的工程设计过程中, 热泵热水器机组的选型和设计计算方面尚无统一的参考标准, 一定程度上影响到设备选型的合理性及运行的经济性。本文研究了热泵机组的出水规律和用户的用水规律, 通过建立全寿命周期成本计算数学模型, 对不同名义制热量的热泵机组进行经济效果综合评价, 寻找最佳技术经济点, 为设备选型与计算、储热水箱最佳容积的确定, 提供参考依据。

^{*} 收稿日期: 2012—01—05

作者简介: 郭强 (1967—), 男, 山西代县人, 副教授; 通讯联系人: 付亚囡。

1 空气源热泵热水机组能效比变化规律

空气源热泵热水机组能效比, 又称性能系数 (COP) 是指热泵的制热量与输入功率之比, 比值越大, 说明空气源热泵热水机组效率越高, 生产同容量同温度的热水消耗的电能越少。机组运行能效比是反映热泵机组加热性能优劣的一个重要参数, 主要取决于室外环境温度、初始加热水温和目标水温。

吴静怡^[4]等指出地理区域差异、用户用水习惯的不同对空气源热泵热水机组年均综合 COP 有一定的影响, 故在设计计算时, 用名义工况下机组运行能效比, 难以准确客观地反映出其真实的节能效果。为了更合理地评价空气源热泵热水机组全年运行的性能指标, G L Morrison^[5]等通过实验结合计算拟合出热泵热水机组季节性 COP 的经验公式:

$$S_{\text{cop}} = [a_1 + a_2 (T_t - T_a)] \left[1 - a_3 \frac{T_a - T_w}{T_a - T_d} \right] \quad (1)$$

其中, S_{cop} 指 COP 值; T_t 、 T_a 、 T_w 和 T_d 分别是水温、环境温度、湿球温度以及露点温度, 单位 K。文献 [4] 对公式 (1) 进行了理论验证, 结果表明公式 (1) 计算出的 COP 能够较为准确地反映出了空气源热泵热水机组在不同环境温度下的实际能效比的变化规律, 具有代表性。对于常州地区, 由公式 (1) 计算出的空气源热泵热水器 COP 与室外环境参数的关系见图 1。

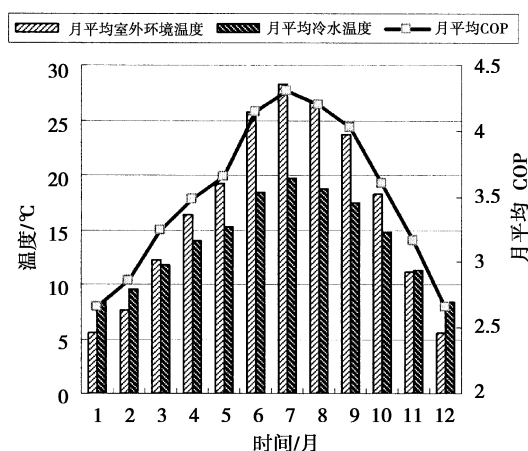


图 1 常州地区空气源热泵热水器 COP 与室外环境温度的关系

Fig. 1 The relation of COP and outdoor temperature in Changzhou

2 空气源热泵制热量的优化选择

由图 1 可以看出, 热泵机组输入功率若按冬季工况来选取, 在其他季节, 随着 COP 值增加其制热量增加, 运行时间减少, 初投资不合理; 若按夏季工况

来选取, 其他季节随环境温度的下降, 机组制热量下降, 辅助电加热器工作时间拖长, 耗电量增大。因此存在一个热泵热水器最佳热容量的选取问题。

2.1 热泵制热量计算

一天制热水共需能量:

$$E = Q_c (t_h - t_0) (1 + \phi) \quad (2)$$

式中: E : 一天制热水共需能量, kJ; Q : 日用水量, L; c : 水的比热, kJ/(kg·°C); t_h : 热水设定温度, °C; t_0 : 进入热水器的冷水温度, °C; ϕ : 热损失系数, 根据热水系统保温状况及管网的布置方式确定, ϕ 取 0.15—0.2。

2.2 热泵机组运行成本计算

热泵运行时间:

$$h = \frac{E}{3\,600 \cdot P \cdot S_{\text{COP}(t_a)}} \quad (3)$$

考虑到热泵机组运行的安全性, 通常设定热泵机组最大运行小时数为 h_r , 当 $h \geq h_r$ 时, 须采用电辅助加热; 当 $h < h_r$ 时, 只需热泵机组加热。

1) $h > h_r$

热泵热水器的加热量:

$$Q_r = \frac{P \cdot S_{\text{COP}(t_a)} \cdot 3\,600}{4.19 \cdot (t_h - t_0) \cdot h_r} \quad (4)$$

电热水器的辅助加热量:

$$Q_d = Q - Q_r \quad (5)$$

热泵的耗电量:

$$e_r = \frac{Q_r \cdot (t_h - t_0)}{S_{\text{COP}(t_a)} \cdot 860} \quad (6)$$

电热水器耗电量:

$$e_d = \frac{Q_d \cdot (t_h - t_0)}{0.95 \cdot 860} \quad (7)$$

2) $h \leq h_r$

热泵的耗电量:

$$e_r = \frac{Q \cdot (t_h - t_0)}{S_{\text{COP}(t_a)} \cdot 860} \quad (8)$$

2.3 热泵制热量优化选择

全寿命周期成本分析^[6] LCC (Life Cycle Cost Analysis) 是一种项目评价的经济方法, 通过把每种成本的现值加起来, 减去回收价值等的现金流入的现值, 然后比较备选方案的优劣, 计算公式如下:

全寿命周期费用 = 前期费用 + 初始成本 + 运营成本 + 修理 + 能源 + 水 + ... + 更换 - 拆除回收余值 - 政府补贴或税赋减免

不考虑前期费用、残值和可回收利用材料价值、政府补贴或税赋减免三项费用，将修理、能源、清洁、水等合并到运营成本中，通过等额支付系列现值公式折算到现在，得到如下数学模型：

$$C_{L,C}=C_0+C_1\left[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}\right]$$
 (9)

式中： $C_{L,C}$ 为全寿命周期费用； i 为年利率，取 10； n 为设备使用寿命，取 15 年； C_1 $\left[\frac{(1+i)^n-1}{i(1+i)^n}\right]$ 为等额支付现值公式； C_0 为空气源热泵热水机组及辅助加热设备的初投资。

LCC 综合反映了热泵热水器的初投资以及运行成本，LCC 值越低，则该方案的经济性越佳，因此将 LCC 值作为热泵热水器优化选择的标准。

3 储水箱容积的确定方法

在热泵热水系统中，为了保证用水的稳定性以及设备投资的经济性，采用热泵热水器和储热水箱联合供水的方式，当热水用量达到峰值时，由热泵热水器和储热水箱同时向系统供应热水，储水箱容积的确定要根据用户端各时段的用水量及热水机组的出水规律来确定。

热泵热水器小时产水量：
$$m_{ci}=\frac{3\,600\cdot P\cdot S_{COP(t_a)}}{c\cdot(t_h-t_0)}$$
 (10)

用户的小时用水量：
$$m_{yi}=\chi_i Q$$
 (11)

储热水箱容积的确定：
$$V=\sum_{i=h_0}^{h+h_0}(m_{ci}-m_{yi})(1+5\%)$$
 (12)

式中： m_{ci} 为空气源热泵热水器小时产水量，L/h； m_{yi} 为用户小时用水量，L/h； χ_i 为各时段用水量占一天总用水量的百分比； Q 为日用水量，L； h_0 ：热泵初始运行时间，h； h 为热泵运行小时数； P 为热泵输入功率，kW； V 为储热水箱有效容积，L。

对酒店、宾馆、学校、医院的一天中各时段用水调研情况如图 2 所示，可作为设计参考。公共建筑物的卫生热水供应一般为 24h，将调研结果分析总结，得到各时段用水量占一天总用水量的百分比。从图 2 可以看出，0：00—5：00 时间段内用水量特别少，用水峰值时间段为 19：00—22：00。

4 工程案例分析

本工程为常州市某大酒店洗浴用水的热水器设计。该酒店地上为 13 层，地下 1 层，建筑面积约

2.4 万 m²。酒店使用洗浴热水的用水点有：酒店餐厅（估计洗刷用水量 3t/d），洗浴中心（估计用水量 20t/d），裙楼屋面游泳池，客房盥洗（约 189 间）等。根据业主要求，依据《建筑给排水设计规范》GB 50015—2003 和相关规定，热水温度为 55℃，经计算总用水量约为 55 000L/d，设计空气源热泵热水器一套，以满足其用水要求。

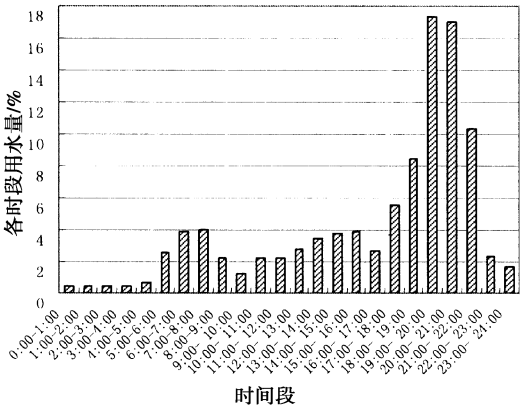


图 2 各时段用水量占日总用水量的百分比
Fig. 2 The percentage of each period water consumption accounts for the total water use

4.1 热泵机组热容量的优化选择

日加热水 55 000L/d 的需热量：
$$E=Q_c(t_h-t_0)(1+\phi)=55\,000\times4.19\times1.1\times(55-t_0)$$

在热水量和目标水温确定时，加热水耗能仅与冷水温度有关，随着冷水温度的增加，加热耗能降低。由图 3 可以看出，随着热泵热水机组能效比 COP 的变化，机组的热容量变化。

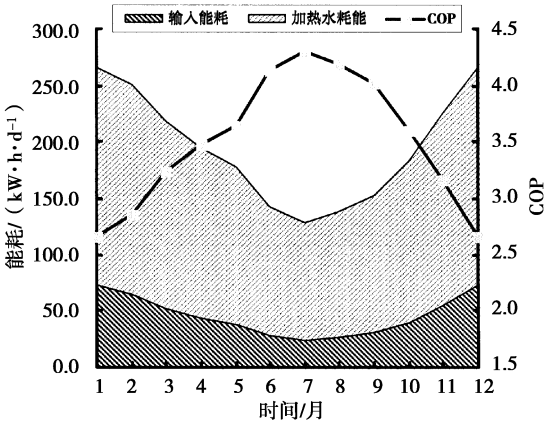


图 3 输入能耗、需热量与 COP 关系曲线
Fig. 3 The curve of input power, required heat and COP
现选择不同热容量的热泵热水器，计算各自的 LCC 值，如表 1，辅助电加热器选取时以最不利的天气条件选取，并以 8h 能够满足加热量进行计算。

表 1 不同热泵容量值对应 LCC 值
Table1 The LCC of different heat pump capacity

热泵容量/kW	56	58	60	62	64	66	68	70
运行费用/元	261 388	255 946	251 537	248 045	244 553	241 061	240 980	240 980
初投资/元	209 998	212 031	214 882	218 459	222 036	225 613	231 997	238 447
LCC/元	2 198 140	2 158 779	2 128 094	2 105 110	2 082 126	2 059 143	2 064 915	2 071 365

根据计算显示,当热泵热水器热容量取得较小时,辅助电加热器的工作时间拖长,比如热泵采用 56kW 的制热量时,共有 120d 需辅助电加热,导致耗电量增加,从而导致 LCC 值增高;当热泵热水器热容量取得较大时,比如选取制热量 70kW 时,夏季只需 6.3h 就可以完全满足获取热水的要求,此时设备大部分时间闲置,经济性降低,LCC 值也较高;当热泵热水器采用 66kW 的制热量时,此时 LCC 值最小,为最经济的热容量。

4.2 储热水箱容积的确定

由公式 (10) 得出,热泵机组的产水速率随着 COP 和冷水温度的变化而变化,如图 4 所示。

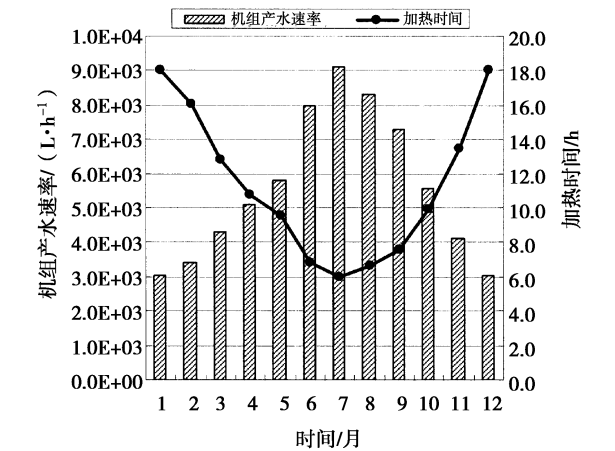


图 4 不同月份 66 kW 热泵机组的产水速率与加热时间
Fig. 4 The water production rate and the heating time of 66kW heat pump in different month

在储热水箱容积设计时,以最不利工况,则
$$m_{ci} = \frac{3\,600 \times 66 \times 2.66}{4.19 \times 49.4} = 3\,053 \text{ L/h}$$
 由公式 (11) 得出,一天中各时段的用水量,见图 5。

根据用户的用水规律,热泵机组的初始加热时间设置在 22 : 00,由图 5 可以看出,热泵运行 18h。则储热水箱容积:

$$V = \sum_{i=h_0}^{h+h_0} (m_{ci} - m_{yi}) (1 + 5\%) = 34\,462 \text{ L}$$

5 结 论

空气源热泵热水系统是一种高效的建筑节能方

式,被广泛的应用于公共建筑卫生热水供应系统。热泵热水机组的制热量随环境气候条件而发生变化,在选择热泵热水器的热容量时,不应使用单位制热量所需耗费的功率指标来评价经济性,而应采用工程经济学中寿命周期成本 LCC 指标来进行评价,从而使初投资和运行费用的综合指标值最小,达到最佳的经济性。在热泵热水系统中,为了保证用水的稳定性以及设备投资的经济性,一般采用热泵热水器和储热水箱联合供水的方式,合理的储热水箱容积设计应根据用户端各时段的用水量及热水机组的出水规律来确定。

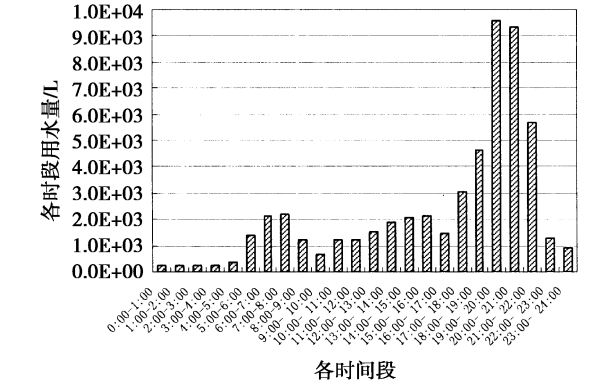


图 5 一天中不同时段用水量
Fig. 5 Water consumption in different times of the day

参考文献:

[1] 国家外经贸部. 我国城市居民能源消耗现状 [J]. 能源工程, 2002 (1): 48.
[2] 龙惟定. 建筑能耗比例与建筑节能目标 [J]. 中国能源, 2005, 27 (10): 23—27.
[3] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径 [J]. 暖通空调, 2005, 35 (5): 30—40.
[4] 吴静怡, 江明流, 王如竹, 等. 空气源热泵热水机组全年综合能效评定 [J]. 制冷学报, 2009, 30 (5): 14—18.
[5] Morrison G L, Anderson T, Behnia M. Seasonal performance rating of heat pump water heaters [J]. Solar Energy, 2004, 76: 147—152.
[6] 中国建设工程造价管理协会. 建设项目全寿命周期成本控制理论与方法 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2007: 46—52.