

沼气机热泵复合式空调系统数值计算与能耗分析^{*}

徐振军 杨 昭

【摘要】 沼气机热泵空调是以农用沼气并辅少量电力作为能源输入,向室内提供冷量或者热量的系统。建立了换热器数学模型、喷水室数学模型、一次回风式空调数学模型,并且定义了评价沼气机热泵空调系统性能的一次能源利用率。通过模型求解,比较了沼气机热泵空调和普通电动热泵空调的能耗情况。结果显示:制冷工况下,沼气机热泵复合式空调系统利用系统余热来实现空气的再热,可达到消除室内余热余湿的目的。系统总的一次能耗最大节能75%。制热工况下,首先通过换热器进行预热,然后通过喷系统热水,进行热湿处理。系统总的一次能耗最大节能71%。沼气机热泵增加了湿处理功能,扩大了沼气机热泵的应用范围。

关键词: 沼气机热泵 空调系统 热湿处理 数值计算 能耗分析

中图分类号: TK479⁺.22; TK6

文献标识码: A

Numerical Calculation and Energy Consumption Analysis for Air Condition System Driven by Biogas Engine

Xu Zhenjun Yang Zhao

(Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract

The heat pump air condition driven by biogas engine (BHPAC) is a new-style air condition system, which is composed of the heat pump driven by biogas engine (BHP), the primary heat exchanger, the second heat exchanger, the water spraying chamber and other auxiliary equipment such as fans, water pumps etc. The mathematic model including the primary heat exchanger model, the second heat exchanger model, the water spraying chamber model, the mixed air model and the BHP model, was established to study the BHPAC system. The primary energy ratio for air condition was defined to evaluate the performance of the air condition. The results show that the air condition driven by biogas engine can save more energy than the heat pump air condition driven by electricity engine. The saving primary energy percentage for BHP is 75% in summer, and the saving primary energy percentage for BHP is 71% in winter. The BHP with the wet processing can be used in more areas than the common BHP.

Key words Heat pump driven by biogas engine, Air condition system, Heat wet processing, Numerical calculation, Energy consumption analysis

引言

农民生活水平和居住环境质量在不断提高。但是,农村电网整体水平仍比较落后,不能够满足供电要求^[1],不适合大规模推行电动空调。燃气机热

泵^[2~7]系统是新近发展起来的新型热泵系统。但是近年来随着国际石油天然气的价格猛涨,燃气机热泵的应用也受到限制。沼气作为一种可再生能源,具有资源广泛、废物利用、价格便宜、排放清洁等特点,已愈来愈受到重视^[8]。沼气发动机驱动的热

收稿日期: 2008-03-31

^{*} 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2007AA05Z223)、国家自然科学基金资助项目(项目编号:50376048)和天津市科技发展项目(项目编号:07ZCGYSF02600、07ZCGYSF01500)

徐振军 天津大学机械工程学院 博士生, 300072 天津市

杨 昭 天津大学机械工程学院 教授

泵 (heat pump driven by biogas engine, 简称 BHP)^[9~10]是以沼气机为动力源,驱动压缩式热泵系统运行的供热、制冷装置。BHP 系统通过回收废气余热和缸套散热量,将显著提高一次能源利用率 (PER)。本文提出的沼气机热泵空调能够收集发动机废热,在低温地区或者冬季应用,具有明显的供暖优势。另外,沼气机热泵空调还具有冬季加湿的作用。在夏季应用,或者在湿度比较大的地区应用,可以实现夏季除湿,因此,沼气机热泵空调开拓了沼气机热泵的湿处理功能以及应用范围,尤其适合沼气资源丰富,但电力相对缺乏的特殊地区。

1 沼气机热泵复合式空调系统原理

图 1 为沼气机热泵复合式空调系统原理图。本系统的主机部分是一个沼气发动机带动一套压缩式热泵系统。室内风处理设备由 2 个换热器、1 个喷水室,以及风机、风管等辅助设备构成。夏季,压缩式热泵系统向室内的一次换热器提供冷水,将部分发动机热水送入再热换热器,喷水室关闭。室外新风和室内回风在一次换热器前混合,经过一次换热器实现降温 and 除湿过程,然后经过再热换热器向室内送风。冬季,热泵系统向室内的一次换热器提供热水,将部分发动机热水送入喷水室。室外新风和室内回风在一次换热器前混合,经过一次换热器实现升温过程,然后经喷水室升温加湿,向室内送风。

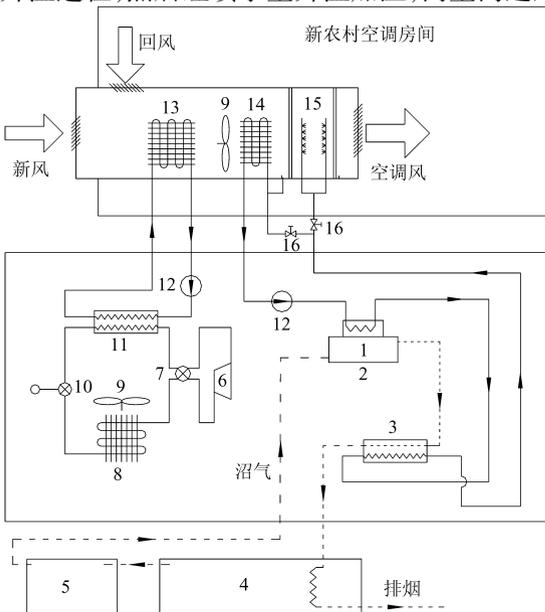


图 1 一次回风式沼气机热泵复合式空调系统

Fig.1 Primary-return-air BHPAC

- 1. 缸套换热器 2. 沼气发动机 3. 排烟换热器 4. 沼气发酵装置 5. 沼气脱水、脱硫装置 6. 活塞式压缩机 7. 四通换向阀
- 8. 翅片管换热器 9. 风机 10. 电子膨胀阀 11. 板式换热器
- 12. 水泵 13. 表冷器(一次换热器) 14. 再热换热器 15. 喷水室 16. 阀门

2 系统性能参数的数学描述

2.1 换热器数学模型

在换热器建模过程中,作如下假设:管内流体在管路中作一维轴向流动;空气和管内流体逆向运动;对水平管不计重力影响;热量传递只考虑垂直于管路的方向,不考虑轴向。

一次换热器空气与管内水的换热描述为

$$GC_p \xi dt_a = \eta_1 W dt_w \quad (1)$$

式中 η_1 ——一次换热器换热效率

G ——空气流量, g/s

ξ ——析湿系数

t_a ——空气温度, °C

t_w ——冷水温度, °C

C_p ——空气的比定压热容, kJ/(kg·K)

W ——冷水流量, g/s

再热换热器空气与管内水的换热描述为

$$GC_p dt_a = \eta_2 W dt_w \quad (2)$$

式中 η_2 ——再热换热器换热效率

2.2 喷水室数学模型

在喷水室建模过程中,作如下假设:喷水室的换热过程对外界是绝热的;空气和水的换热不受喷嘴位置和结构的影响;不考虑重力影响;空气运动方向和喷水方向是逆向的。

喷水室内空气与水的换热^[11]描述为

$$\frac{dT_w(l)}{dl} = K_1(d_w(l) - d(l)) + K_2(T_w(l) - T(l)) \quad (3)$$

$$\frac{dd(l)}{dl} = K_3(d_w(l) - d(l)) \quad (4)$$

$$\frac{dT(l)}{dl} = K_4(T_w(l) - T(l)) \quad (5)$$

式中 $T(l)$ ——各断面空气的干球温度, °C

$d(l)$ ——各断面空气的含湿量

$d_w(l)$ ——各断面水的散湿量

$T_w(l)$ ——各断面的水温, °C

K_1, K_2, K_3, K_4 ——比例系数^[11]

2.3 一次回风混合数学模型

在混风建模过程中,作如下假设:新风、回风混合过程中,没有能量损失;整个混合箱内各点的空气温度湿度等状态参数是一致的;不考虑漏风和风压变化。

新风与回风混合能量变化描述为

$$G_w i_w + G_n i_n = (G_w + G_n) i_c \quad (6)$$

式中 G_w ——新风量, kg/s

G_n ——空调回风量, kg/s

i_w ——新风的焓值, kJ/kg

i_N ——室内空气状态点的焓值, kJ/kg

i_C ——一次回风混合状态点的焓值, kJ/kg

2.4 复合式空调系统参数描述

制冷工况系统的热湿处理能力为

$$Q_r = G(i_C - i_L) \quad (7)$$

式中 i_L ——一次换热器后空气的焓值, kJ/kg

制热工况系统的热湿处理能力为

$$Q_h = G(i_O - i_C) \quad (8)$$

式中 i_O ——室内送风点空气的焓值, kJ/kg

一般采用一次能源利用率(PER)^[10]来表示沼气机热泵系统性能。

定义复合式空调系统一次能源利用率为

$$P = \frac{Q}{E} \quad (9)$$

式中 Q ——制冷工况或者制热工况下 BHP 系统的热湿处理能力, kW

E ——系统一次能源消耗量, kW

普通电动热泵(EHP)空调系统的一次能源利用率为

$$P_e = \frac{Q_c}{E_c} \quad (10)$$

式中 Q_c ——制冷工况或者制热工况下普通 EHP 空调系统的热湿处理能力, kW

E_c ——普通 EHP 空调一次能源消耗量, kW

沼气机热泵系统计算采用文献[7]所述方法,将天然气物性计算换成沼气物性计算。

3 算例及分析

算例为天津郊区某会议室:建筑面积 150 m²,夏季室内总冷负荷和湿负荷分别为 20 kW 和 12 kg/h,新风量为 900 m³/h。冬季室内总冷负荷和湿负荷分别为 15 kW 和 -8 kg/h,新风量为 500 m³/h。喷水室:离心喷嘴;喷嘴密度 13 个/(m²·排);喷嘴前水压 0.2 MPa, 2 排对喷。换热器:每排散热面积 44.5 m²,迎风面积 3.43 m²,通水断面面积 0.005 53 m²,盘管 8 排。

图 2、3 分别是夏季运行工况,节能率随室外空气干球温度和相对湿度的变化曲线。室外空气干球温度的变化直接影响着室内的热负荷和室外空气参数。当室外干球温度增大的时候,系统需增大制冷量。室内送风温差固定,处理的风量增加,再热量相应增加。制冷工况,沼气机热泵复合式空调系统的节能主要体现在再热换热器和压缩机节能上。再热量越大,制冷量越大,节能就越多。计算显示,系统一次能源平均节能 58%,最大节能率达到 60%。当

室外空气相对湿度增加,一次换热器的热湿处理能力增强,使压缩系统的制冷量增加,压缩机的功率相应增大。湿负荷增加同样导致再热换热器的再热量增加。因此室外空气相对湿度越大,节能就越多。计算显示,系统一次能源平均节能 61%,最大节能率达到 75%。由图 2、3 还可以看出,室外空气湿度的变化对于系统节能率的影响要大于室外干球温度的变化。在湿度更大的地区应用该系统的节能效果更加明显。

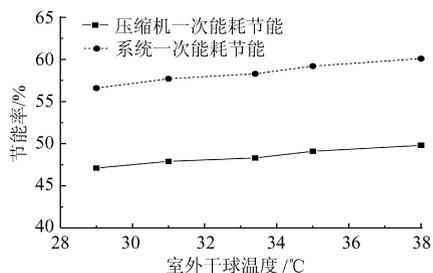


图 2 夏季系统节能率随室外干球温度的变化曲线

Fig. 2 Variation of saving energy percentage with outdoor air dry-bulb temperature changing in summer

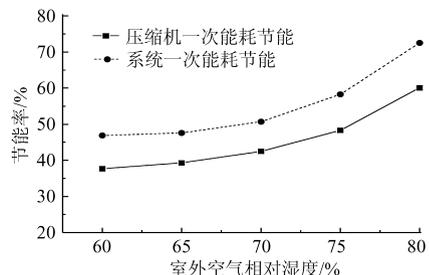


图 3 夏季系统节能率随室外相对湿度的变化曲线

Fig. 3 Variation of saving energy percentage with outdoor air relative humidity changing in summer

图 4、5 分别是冬季运行工况节能率曲线图。当室外干球温度降低,室内热负荷增加,压缩机的输出功率增大,一次能耗的节能率增大。但是当室外温度不是很低(5°C 以上)时,随着室外干球温度的增加,系统的节能率升高。这时可以主要利用发动机的余热进行室内供暖,不利用或者少利用压缩系统进行供暖。这样就会提高其一次能源利用率。当室外温度低于 0°C 时,室外气候处于寒冷季节, EHP 需

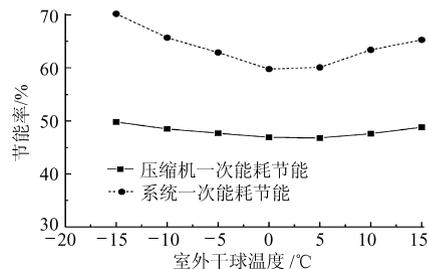


图 4 冬季系统节能率随室外空气干球温度的变化曲线

Fig. 4 Variation of saving energy percentage with outdoor air dry-bulb temperature changing in winter

要采用电加热器辅助供暖,而 BHP 系统利用发动机废热辅助供暖,因而更加节能。在此计算工况下,系统一次能源平均节能 65%,最大节能率为 71%。最大室外空气相对湿度的变化,影响着新风湿负荷。相对湿度减少促使喷水室热湿处理能力增大。制热工况下,系统的节能主要体现在压缩机系统和喷水室。由图 5 可以看出系统一次能源平均节能 59%,最大节能率为 64%。

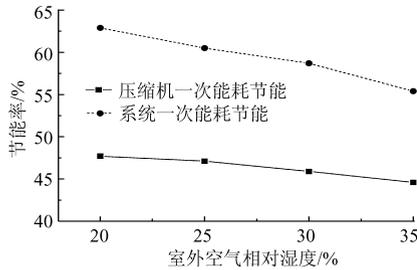


图 5 冬季系统节能率随室外空气相对湿度的变化曲线

Fig. 5 Variation of saving energy percentage with outdoor air relative humidity changing in winter

4 结论

通过建立换热器的数学模型、喷水室数学模型、新风回风混合数学模型,以及定义 BHP 复合空调系统的性能系数 PER,研究了 BHP 空调系统和 EHP 空调系统的节能效果。结果显示:

(1) 沼气机热泵复合式空调系统的性能好于常规 EHP 空调系统。制冷工况下,系统一次能耗最大节能 75%。制热工况下,系统总的一次能耗最大节能 71%。

(2) 在夏季,随着室外温度的升高和室外空气湿度的增加,其压缩机节能和系统一次能耗节能更加明显;在冬季,室外湿度越低,室外环境温度越偏离机组的设计环境温度,其压缩机节能和系统一次能耗节能就越明显。

(3) 沼气机热泵增加了湿处理功能,其湿处理过程节能明显,沼气机热泵的应用范围扩大。

参 考 文 献

- 卢继平,叶全强,唐朝,等. 新农村建设中农村电网建设的探讨[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(7):50~54.
Lu Jiping, Ye Quanchang, Tang Chao, et al. Discussion in the rural power network construction in the new rural construction[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007,30(7):50~54. (in Chinese)
- Zhang R R, Lu X S, Li S Z. Analysis on the heating performance of a biogas engine driven air to water heat pump based on a steady-state model[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(11~12): 1 714~1 730.
- Li Yinglin, Zhang Xiaosong, Cai Liang. A novel parallel-type hybrid-power biogas engine-driven heat pump system[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1 134~1 142.
- Li Shuze, Zhang Wugao, Zhang Rongrong. Cascade fuzzy control for biogas engine driven heat pump [J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(11~12): 1 757~1 766.
- Lian Zhiwei, Park Seong Ryong, Huang Wei. Conception of combination of biogas-engine-driven heat pump and water-loop heat pump system[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(6): 810~819.
- Wang R Z, Oliveira R G. Adsorption refrigeration——an efficient way to make good use of waste heat and solar energy[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2006, 32(4): 424~458.
- 张世钢. 燃气机热泵仿真与优化匹配研究[D]. 天津:天津大学,2003.
Zhang Shigang. Simulation and optimum matching study on gas engine driven heat pumps[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- 许传国,宋伟杰,刘东,等. 12V190 系列沼气发动机的研制开发[J]. 中国沼气,2003,21(增刊):204~207.
Xu Chuanguo, Song Weijie, Liu Dong, et al. Research on 12V190 biogas engine[J]. China Biogas, 2003, 21(Z): 204~207. (in Chinese)
- 吴集迎. 沼气热泵系统设计及其经济性分析[J]. 农业机械学报, 2006,37(12): 114~117.
Wu Jiyong. System design and economic analysis of absorption heat pump driven by biogas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(12): 114~117. (in Chinese)
- 吴集迎. 沼气发动机驱动的热泵能源利用率计算[J]. 可再生能源, 2007,25(5): 49~52.
Wu Jiyong. PER calculation of a biogas engine driven heat pump system[J]. Renewable Energy Resources, 2007,25(5): 49~52. (in Chinese)
- 李刚,黄翔,颜苏芊. 喷水室热、质传递的理论分析[J]. 纺织高校基础科学学报,2002,15(4):337~340.
Li Gang, Huang Xiang, Yan Suqian. Theoretical study on heat and mass transfer in the air-washer[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2002,15(4):337~340. (in Chinese)