

热泵型蓄能空调蓄热性能测试及经济性分析

屈 岩, 王 芳, 刘振东, 王宏杰, 张振亚

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 根据蓄能空调系统自身的特点,建立了蓄能空调的蓄热装置(双盘管蓄热水槽)蓄热过程的物理模型,并结合蓄能槽的结构特点进行机组性能测试及能耗分析.结果表明,采用将释热盘管安装在蓄热槽上部并适当减小释热盘管直径的方法,可以使双盘管有效释热,并能改善传统单盘管分层严重的现象.在测试冬季 3 种运行工况性能系数均值的基础上,通过建立投资回收期模型的数据分析,得出其具有良好的经济效益.

关键词: 蓄能空调; 蓄热装置; 双盘管; 性能测试; 经济分析

中图分类号: TB 65 **文献标志码:** A

Heat Storage Performance and Economic Analysis on Heat Pump Air Conditioning

QU Yan, WANG Fang, LIU Zhendong, WANG Hongjie, ZHANG Zhenya

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: According to the characteristics of energy storage air conditioning system, a physical model of regenerative process for the energy-storage air conditioning heat storage device(double coil heat storage water tank) was established. Performance testing and energy consumption analysis were completed in consideration of the structure characteristics of the energy storage tank. The results show that installing the heat coil in the upper part of the heat storage tank and making the heat releasing diameter be half of the heat coil diameter can make the heat release process more effective than the traditional, and the double coil immersion heat storage tank can improve the stratifying phenomenon of the traditional single coil structure. Date analysis based on establishing a payback period model of investment confirms that the proposed design has good economic efficiency.

Key words: energy storage air conditioning; heat storage device; double coil; performance test; economic analysis

收稿日期: 2013-10-19

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(S30503)

第一作者: 屈 岩(1990-),女,硕士研究生.研究方向:节能制冷空调技术. E-mail:quyan0911020105@163.com

通讯作者: 王 芳(1966-),女,副教授.研究方向:节能制冷空调技术. E-mail:wang1996903@163.com

蓄能空调作为电力“移峰填谷”的有效手段,将电网负荷低谷期(晚间休息时段)的电力用蓄能机组,利用蓄能介质(如水、共晶盐)的潜热或显热效应将能量“储存”起来;在电网负荷的高峰期(白天工作时段),再将热量或冷量释放出来供给建筑物空调使用,从而承担了高峰期空调所需的全部或部分负荷。目前国内外对大型蓄能空调技术的研究开发较深入,设备齐全,但是,对于小型蓄能空调机组的理论研究、设备研发、技术创新有待提高,以适应社会各个层面的节能需要。

曾文良等^[1-3]对热泵型蓄能空调器进行了研究,用热泵型蓄能空调器的制冷方法对热泵型蓄能空调低温制热、除霜等性能进行了全面的实验研究,并作了对比分析。齐琦等^[4]研究相变蓄热材料的稳定性、腐蚀性、相分离、过冷以及封装特性对蓄热的影响。

蓄能槽作为小型热泵型蓄能空调系统的重要设备,能够很好地协调制冷、制热、蓄冷、蓄热、释冷和释热多种工作模式在供应时间上的矛盾。蓄能槽设计方案的合理与否将会影响整个系统性能的好坏,设计合理的蓄热装置可以充分利用时间、空间,达到较好的系统效果,并且可以提高系统的性能系数 COP ^[5]。

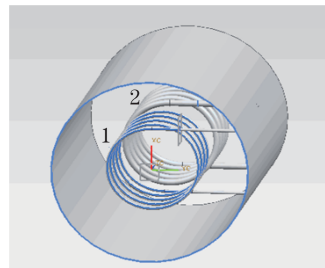
传统单盘管采用多种水蓄热方式,蓄热时,制冷剂在金属管内直接冷凝并放出热量;释热时,制冷剂吸收蓄能槽中的热量,然后通过空调系统将热量送到空调负荷端。但是,传统单盘管结构使得制冷剂沿螺旋管弯曲的方向呈一维流动状态,这易导致蓄能槽中的水发生分层现象,严重影响换热效果,降低系统效率。为此,本文设计了一种蓄热盘管和释热盘管相互独立的双盘管蓄能槽,以提高蓄能空调在释热工况下的运行效率。

1 蓄能槽双盘管结构设计模型

通过实验研究发现,在整个加热过程中,加热时间越长,蓄能槽中热水温度的分层厚度越大。蓄能槽内的热水温度出现明显的分层现象,蓄能槽上部的水温在整个热水加热的过程中始终较高,而下部水温较低。

放热过程中,由于热水借助水泵的动力进行循环流动,使得换热过程更加有效,换热更加充分^[6-7]。由于温度较高的热水大都位于蓄能槽的上部,所以,可以把释热盘管安装在蓄能槽上部,并将释热盘管的直径设计为小于蓄热盘管的直径,采用这种设计

方式可以使双盘管有效释热,如图1所示。内部蓄热盘管和释热盘管分别为 $\phi 12\text{ mm}$ 和 $\phi 6.5\text{ mm}$ 。



1. 释热盘管 2. 蓄热盘管

图1 蓄能槽内部构造示意图

Fig.1 Schematic of the internal structure of accumulator tank

2 实验原理及理论分析

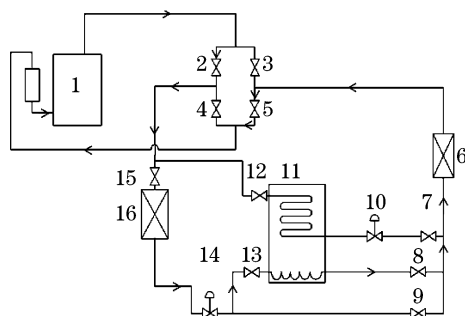
2.1 实验原理

热泵装置在环境温度较低的情况下,室外机组的换热器会经常结霜,严重影响其制热效果。热泵在化霜时会停止向室内供热,因此,造成了室内温度的波动,同时使热泵运行效率下降。蓄热型热泵可以较好地改善热泵在低温下的运行性能,它利用低谷电力以及蓄热介质的显热或潜热特性,用一定的方式将热量储存起来;而在电力负荷的高峰期将热量释放出来,以满足空调或生产工艺的需要。

本文所选用的蓄能型热泵空调系统主要由热泵机组和蓄能槽组成,考虑到实验的可操作性,将四通换向阀替换为手动阀。通过阀门开关实现3种运行工况:常规热泵运行;蓄热运行;释热运行,如图2所示(见下页)。其中,以常规单盘管热泵运行时,阀门2,5,9,15打开,其余阀门关闭,节流装置14处于节流状态;以蓄热工况运行时,阀门2,5,7,12打开,其余阀门关闭,节流装置10处于节流状态;以释热工况运行时,阀门2,5,8,13,15打开,其余阀门关闭,节流装置14处于节流状态。

2.2 理论分析

在冬季,随着室外环境温度的降低,热泵运行过程中,蒸发温度和蒸发压力有明显的降低,因此,压缩机的吸气压力也会下降,吸入制冷剂蒸汽的密度减小,压缩机单位时间的实际排气量减小,其制热能力自然会有所降低。另外,当室外温度和吸气压力同时下降时,为了确保室内供暖的效果,冷凝温度和冷凝压力必须要保持相应的水平,这样就导致了压缩机压缩比的增大。随着压缩比的增大,压缩机电机内



1. 压缩机 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 12, 13, 15. 截止阀 6. 室外侧换热器
10, 14. 节流装置 11. 蓄能槽 16. 室内侧换热器

图2 小型热泵空调系统运行管路图

Fig.2 Piping diagram of small heat pump air conditioning system

部线圈的发热量增加,使得压缩机的工况条件变得更加恶劣.而设计蓄能热泵空调系统,在电力低谷时蓄热,在电力高峰时释热,采用低耗能的循环系统,使得制冷剂流经蓄能槽后,一部分制冷剂温度有所提高,增加吸气的温度,从而缓解冬季制热量的不足、除霜频率过大等问题.普通热泵运行与释热运行的 $\lg p-h$ 图(p 为压强, h 为焓)对比如图3所示,图中 $a-b-d-e-f-i-a$ 为释热运行循环, $h-e-f-g-h$ 为常规单盘管热泵运行循环.

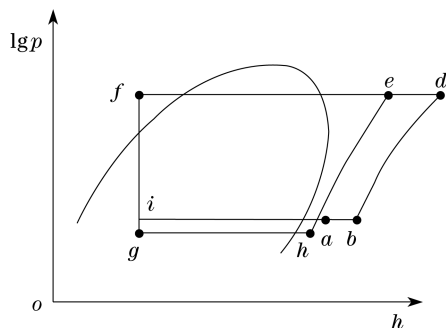


图3 释热运行与常规运行 $\lg p-h$ 对比图

Fig.3 Comparison of $\lg p-h$ charts between heat release operation and routine operation

根据图3可知,常规单盘管热泵的制热量 q_k 为图中 e 点与 f 点的焓差.

$$q_k = h_e - h_f \quad (1)$$

系统进行释热运行时,其制热量 q_k^* 为 d 点与 f 点的焓差.

$$q_k^* = h_d - h_f \quad (2)$$

由于 $q_k^* > q_k$, 所以,蓄能型热泵空调系统由于吸入的制冷剂蒸汽过热使得其制热量增大,同时,由于制冷剂进入室外换热器蒸发以前,并非过冷,将使得蒸发温度有所提高,这就避免了室外侧换热器严

重结霜的可能.可以改善机组运行性能,减少除霜次数,在一定程度上可以提高 COP .

3 蓄能空调系统运行过程实验测试与常规热泵的对比分析

3.1 实验工况

上海市属于北亚热带季风性气候^[8-10],极端最高气温 40.2°C ,极端最低气温 -12.1°C ,夏季平均气温 29°C ,冬季平均气温 9°C ,湿度一般在 $60\% \sim 75\%$ 左右.考虑到实验的对比与分析过程,在模拟室外工况时,选取湿度为 70% 左右,干球温度范围为 $0 \sim 10^\circ\text{C}$,实验工况参数如表1所示.

表1 试验工况参数表

Tab.1 Table of test condition parameters

工况	室外干球温度/ $^\circ\text{C}$	室外湿球温度/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/%
1	10.0	8.0	69.0
2	7.0	6.0	70.1
3	2.0	1.0	69.0

3.2 蓄热分析

在蓄热系统运行过程中,随着系统加热过程的进行,径向上温度梯度的变化越来越小.蓄能槽内的热水在水箱径向方向上的温度梯度变化不大,只是在系统运行的最初时刻沿径向方向有少许变化,而热水沿轴向方向上的温度梯度变化十分显著,在运行过程的最后阶段,处于蓄能槽底部的水温变化非常明显,而处于上部的水温却基本无明显变化,随着加热的持续进行,蓄能槽内温度呈均匀分布的区域越来越大.

3种工况下蓄能槽内部平均温度对比如图4所示.在蓄热过程的前一阶段($0 \sim 24$ min),工况1环境温度虽然较高,但蓄能槽温度上升的速率并不高,在这一阶段,工况2时温度升高速率反而较快,工况3居中;在后一阶段($24 \sim 116$ min)明显可以看出,环境温度较高的工况,其蓄能槽内部水温也上升较快.同时,两个阶段中,前一阶段温度升高速率都比较慢,而后一阶段温度升高速率都相对较快.

根据实验分析可知,由于室外环境温度低于水箱内部水温,运行的初期时刻,压缩机的排气温度相对较低,导致其水温上升速度较慢.而随着压缩机工作的运行,慢慢达到稳定工况,此时系统可以稳定地向水箱内部输入热量.

3.3 释热分析

本文主要研究在释热状态下空调热泵的工作状

况.采用环境空调热泵热水器标准即在工况2(室外环境干、湿球温度分别为7℃和6℃)时作为研究重点.图5和图6为在该工况下前一个小时内的压缩机吸气、排气温度.

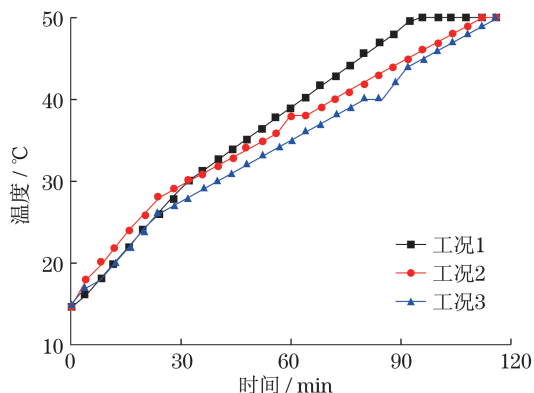


图4 3种工况下蓄能桶内部平均温度

Fig.4 Average temperature inside the accumulator tank under three kinds of conditions

在释热运行下的压缩机吸气温度比常规热泵运行时的温度高出4.5℃左右,到稳定运行以后高出3℃左右;而释热运行时的排气温度比常规热泵运行时的排气温度有较大的提高,在初始阶段高出15~17℃,运行稳定后高出了10℃左右.由此说明,与常规热泵运行相比,在工况2的情况下,加入了蓄能槽以后,压缩机的进口温度和出口温度都有了相应的提升,其中,排气温度上升的幅度较大,这有利于提高空调系统的制热效果.后期系统整体运行比较稳定,这说明蓄能槽对系统具有较好的调节作用.

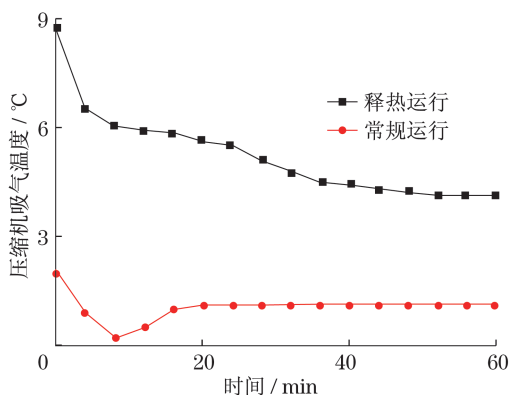


图5 工况2下压缩机吸气温度

Fig.5 Compressor suction temperature in case 2

随着释热时间的增加,蓄能槽内各处的水温逐渐下降,且温度下降的速率随着蓄能槽深度的增加而增大.蓄能槽上部高温水的温度由于自然对流的影响相对比较均匀.因此,在释热过程中,大部分都

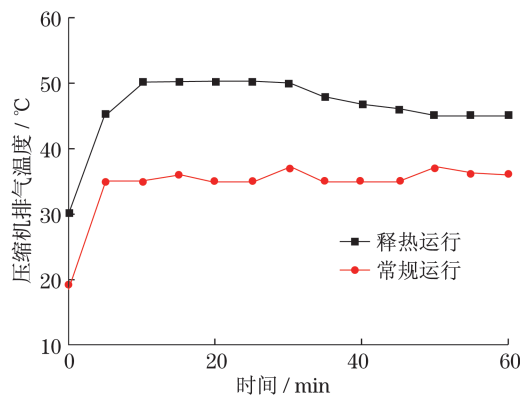


图6 工况2下压缩机排气温度

Fig.6 Compressor discharge temperature in case 2

是温度较高的热水参与释热,这恰恰可以使蓄能空调运行的需要得以满足.从下部流入的水温随着蓄能槽内热水温度逐渐下降而越来越低,此时蓄能槽内的冷热水得到比较充分的混合,槽内水温下降的速度加快.因此,与常规单盘管热泵运行相比,在工况2的情况下,释热运行中COP的绝对值高于常规热泵运行时的COP,如图7所示.

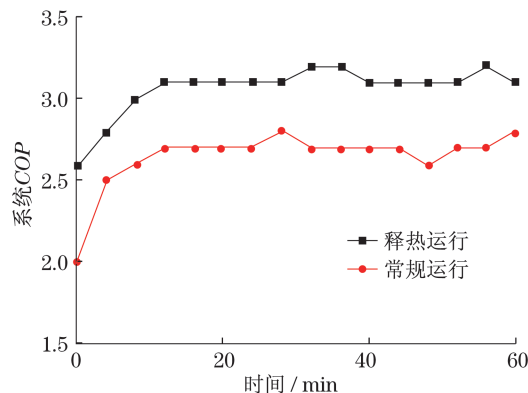


图7 工况2下COP对比

Fig.7 Comparison of COP in case 2

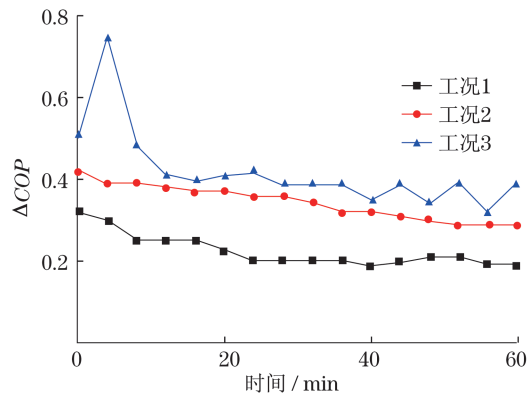


图8 系统COP上升值对比

Fig.8 Comparison of the system COP value added

ΔCOP 为释热运行和普通热泵运行 COP 的差值. 由图 8 可知, 在 3 种工况下分别进行释热运行和普通热泵运行, 系统 COP 均比常规热泵空调运行 COP 有明显的提高. 其中, 在工况 1、工况 2 和工况 3 中, 系统的 COP 平均增幅分别为 0.228, 0.335 和 0.421. 易见, 在工况 3 条件下进行释热运行时, 系统的 COP 提升较为明显, 即室外环境温度越低, 蓄能槽在系统运行中所起到的作用越明显. 从图 8 还可以看出, 随着系统运行时间的持续, COP 的增幅下降, 这是因为蓄能槽内蓄热介质的温度在下降, 与释热盘管之间的热交换量在减少, 因而制冷剂吸收的热量也在下降.

本系统所采用的蓄热装置与传统单盘管蓄热水槽相比较, 具有蓄能过程中出现的蓄能槽内上部温差小、下部温差大的特点, 这对于整个系统在释热状态下的运行是非常有利的.

4 经济性分析

蓄能空调投资回收期

$$N = \frac{I_n}{P_h W_i} \frac{\Delta \alpha}{K n'_i \left[\frac{COP_i}{COP_n} (1 - \alpha) - \alpha \right]} \quad (3)$$

式中, I_n 为常规空调器的初期投资费用; P_i, P_h 为低谷电价和高峰电价; $\Delta \alpha$ 为每年节约的运行费用; α 为空调供热量与蓄热水槽蓄热量之比; K 为一年中使用空调天数; α 为低谷电价与高峰电价之比, $\alpha = P_i/P_h$; W_i, W_n 为蓄能空调蓄热时耗电功率和常规空调工作状态下的耗电功率; COP_i 和 COP_n 分别表示蓄能空调蓄热时和常规空调工作状态下的 COP ; n'_i 为蓄能空调的蓄热小时数.

影响蓄能空调投资回收期的因素主要包括: 峰谷电价的价格差额、初期投资的增加额、每年使用空调的总天数以及当地的气候状况等. 以上海市为例计算其经济性. 查询上海市 2013 年 1~3 月和 2012 年 11 和 12 月的天气气温、湿度情况, 一月份上海市平均温度最低, 其次分别是 12 月、2 月、3 月和 11 月^[11]. 其中, 日平均最低温度点出现在 6:00~7:00, 此时平均温度为 3.6℃. 平均温度下, 11 月和 12 月平均温度较高, 其它依次为 3 月、1 月和 12 月. 其中, 5 个月的平均湿度约为 70%. 同时, 上海市低谷电价时段中 22:00~24:00 的环境温度相对较高, 可以选取这一时段作为蓄热时段.

表 2 为上海市居民用电电价, 根据上海市的实

际天气情况, 选取热泵机组在 22:00 至第二天 6:00 的低谷电价时段工作, 可以避开较低的温度时段, 有利于系统运行, 采取这 2 h 作为夜间完全蓄热时间. 计算结果如表 3 所示.

表 2 上海居民用电价(第一档)

Tab.2 Shanghai civil electricity prices

用电时间	电价/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
高峰时段	06:00~22:00
低谷时段	00:00~06:00
	22:00~24:00

表 3 蓄能热泵空调经济性分析结果

Tab.3 Economic analysis results of storage heat pump

参 数	数值
常规空调器价格/(元·台 ⁻¹)	5 000
蓄能型热泵空调投资费用比率/%	20
白天运行时间/h	8
夜间蓄热时间/h	2
白天空调运行平均 COP	3.1
夜间空调运行平均 COP	2.5
平均每年使用的天数(制热)/d	120
初期投资的回收周期/a	3.5

从表 3 可知, 小型蓄能型热泵空调对电网“移峰填谷”的作用明显, 经济性也显而易见, 因而具有良好的经济效益. 但是, 如果减少每天使用空调的时间或者年使用的天数时, 其回收周期有所延长. 如每天使用空调 6 h, 每年使用空调 90 d, 其回收时间变为 6.3 a. 因此, 用户选择使用小型蓄能空调系统时, 除了要考虑当地电价政策与地区气候特征外, 还要考虑自身使用的具体情况.

5 结 论

通过建立双盘管蓄热水槽的物理模型, 实验研究了不同工况下蓄热过程和释热过程中压缩机功率变化情况, 以及在空调热泵热水器标准工况 2 条件下释热运行与常规单盘管热泵运行的比较. 结果表明, 将释热盘管安装在蓄能槽上部, 并将释热盘管的直径设计为小于蓄热盘管直径, 可以使释热过程的时间更加持久, 并能很好地缓解蓄能槽中的分层现象, 释热运行时系统的 COP 平均提高 10% 左右. 进行经济性计算得出, 此种双盘管蓄能槽热泵空调机组对电网“移峰填谷”作用明显, 具有良好的经济效益.

参考文献:

- [1] 曾文良,梁启明.蓄热热泵空调器:中国,01240625.2 [P].2002-03-20.
- [2] 曾文良,曲景年.几种蓄热热泵空调器的性能比较[J].暖通空调,2004,34(11):45-50.
- [3] 曾文良,高日新.不间断制热的运行方法及空调系统:中国,01127805.6 [P].2003-03-19.
- [4] 齐琦,姜益强,马最良.相变蓄热材料及其在暖通空调领域中的应用[J].建筑热能通风空调,2006,25(3):18-19.
- [5] 颜慧磊,张华,邵秋萍.一种太阳能与空气源双热源热泵系统的性能研究[J].上海理工大学学报,2014,36(2):177-180.
- [6] Cabeza L F, Mehling H, Ziegler F. Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage [J]. Applied Thermal Engineering,

2002,22(10):1141-1151.

- [7] O'Brien J M, Bansal P K, Raine R R. An integrated domestic refrigerator and hot water system [J]. International Journal of Energy Research, 1998, 22(8):761-776.
- [8] Farid M M, Khudhair A M, Razack S A K, et al. A review on phase change energy storage: materials and applications [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9/10):1597-1615.
- [9] 林小苗,倪龙,江辉民,等.公共建筑用空气源热泵热水机组初探[J].建筑科学,2009,25(2):55-59.
- [10] 韩志涛,姚杨,马最良,等.空气源热泵蓄能热气除霜新系统与实验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007,39(6):901-903.
- [11] 周峰,马国远.空气能热泵热水器的现状及展望[J].节能,2006(7):13-17.

(编辑:石瑛)

(上接第17页)

参考文献:

- [1] Shao X Y, Wang Z H, Li P G, et al. Integrating data mining and rough set for customer group-based discovery of product configuration rules [J]. International Journal of Production Research, 2006, 44(14):2789-2811.
- [2] Hong G, Xue D, Tu Y. Rapid identification of the optimal product configuration and its parameters based on customer-centric product modeling for one-of-a-kind production [J]. Computers in Industry, 2010, 61:270-279.
- [3] Gau W, Buehrer D. Vague sets [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1993, 23(2):610-614.
- [4] Mitra S, Pal S K, Mitra P. Data mining in soft computing framework: a survey [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(1):3-14.
- [5] 李云先,彭敦陆.大学生网络行为方式的模糊分析[J].上海理工大学学报,2013,35(2):107-112.
- [6] 杨晓慧,王莉莉,李登峰.一种新的层次谱聚类算法[J].上海理工大学学报,2014,36(1):49-52.

- [7] 曹易,张宁.一种改进的模糊C-均值聚类算法[J].上海理工大学学报,2012,34(4):351-354.
- [8] 李香音.区间直觉模糊连续交叉熵及其多属性决策方法[J].计算机工程与应用,2013,49(15):234-237.
- [9] Zhang Q S, Jiang S Y. A note on information entropy measures for vague sets and its applications [J]. Information Sciences, 2008, 178(21):4184-4191.
- [10] Geng X, Chu X, Zhang Z. A new integrated design concept evaluation approach based on vague sets [J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37:6629-6638.
- [11] Lin M, Wang C, Chen M, et al. Using AHP and TOPSIS approaches in customer-driven product design process [J]. Computers in Industry, 2008, 59:17-31.
- [12] Chan L, Wu M. A systematic approach to quality function deployment with a full illustrative example [J]. Omega, 2005, 33(1):119-139.
- [13] Zhang D, Huang S, Li F. Approach to measuring the similarity between vague sets [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004, 32(5):59-60.

(编辑:丁红艺)