

基于数据统计的办公建筑多联机行为调节

赵德印¹, 张旭¹, 钟鸣^{1,2}

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 大金(中国)投资有限公司, 上海 200040)

摘要: 以开机率表征变制冷剂流量多联机行为调节特性, 对上海某办公建筑做了制冷制热共 1 年的数据调研. 数据统计发现制热期间最大开机率仅为 60% 左右, 制热能耗随开机率增大基本呈线性变化, 统计区间样本数据能耗极差最大值为 0.4 左右. 制冷能耗随开机率增大呈先缓后陡的指数变化增大趋势, 对应极差最大值为 0.55 左右. 使用数据包络分析法和 Parzen 窗法进一步分析了能耗随开机率的变化特性, 研究结果表明, 变制冷剂流量多联机系统在制热期间发生有效行为调节的概率为 0.54, 制冷期间发生有效行为调节的概率为 0.44.

关键词: 办公建筑; 变制冷剂流量多联机(VRF); 行为调节; 开机率(OUR); 数据统计

中图分类号: TU831.7

文献标志码: A

Behavior Regulation of Variable Refrigerant Flow System in Office Building Based on Statistical Analysis

ZHAO Deyin¹, ZHANG Xu¹, ZHONG Ming^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Daikin (China) Investment Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: Operating unit ratio (OUR) was addressed to analyse behavior regulation of variable refrigerant flow (VRF) system. Correspondingly one office building located in Shanghai was investigated to get data of one year including cooling and heating periods. Statistical results showed that maximum value of OUR was about 60% during heating period, the corresponding energy consumption of VRF keeps in line with the increase of OUR and the maximum range value of sample data during statistical intervals was about 0.4. As to the energy consumption in cooling period, it shows exponential variation (ie. flat at beginning and steep in the subsequent) with the increase of OUR, the maximum range value of sample data during statistical intervals was about 0.55. Data envelope analyse (DEA) and Parzen window were

used to further investigate the variation characteristics of behavior regulation. Results showed that probability of effective behavior regulation during heating period was about 0.54 and that corresponding value during cooling period was about 0.44.

Key words: office building; variable refrigerant flow system (VRF); behavior regulation; operating unit ratio (OUR); statistical analysis

为提供舒适的工作环境及提高员工工作效率, 现代办公建筑中普遍配备了空调系统, 与此对应的是, 空调系统在建筑中的能耗占比也越来越大^[1-2]. 围绕空调系统节能降耗, 众多研究人员对建筑围护结构、空调系统能效、建筑运行管理水平、人员行为等方面做了大量研究. 其中人员行为对舒适性空调系统能耗的影响显而易见, 如人员在室率、窗、照明、电器设备开关等, 均会造成空调系统负荷发生较大变化. 相对于其他因素来说, 人员行为具有较大的不确定性, 引起了国内外众多研究人员的兴趣. 美国采暖、制冷与空调工程师学会(ASHRAE)通过对众多建筑的调研统计, 给出了人员作息推荐时间表^[3]. 当前各类能耗软件如 Energyplus^[4]和 Dest^[5]等均普遍采用时间表模式对人员、设备等热扰作简化处理.

Zhang 等^[6]对办公室中人员行为研究做了总结, 归纳为直接法和间接法. 直接法即为直接用相关仪器跟踪、记录人的各项行为及活动轨迹, 但该方式由于商业机密及用户隐私保护等原因较少被人接受. 当前对人员行为研究主要采用间接法, 如 Zhao 等^[7]通过对办公室设备耗电数据的分析得出了人员行为模型. D'Oca 等^[8]系统阐述了通过数据挖掘方法来分析相关数据, 得出人员行为模型的过程. 以上研究的核心是得出人员、设备等在室率, 人员行为通过人体散热、设备开关等方式产生的负荷作用于空

收稿日期: 2015-08-03

第一作者: 赵德印(1980—), 男, 博士生, 主要研究方向为建筑节能技术. E-mail: zhvac01@126.com

通讯作者: 张旭(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空调热湿交换理论与应用、复杂通风系统应用.

E-mail: zhangxu-hvac@tongji.edu.cn

调系统,人员与空调系统不发生物理接触.这在配备有(半)集中式空调系统的建筑中是合适的,因为空调系统属于集中控制,室内人员无法改变空调系统的运行参数,然而对于配备变制冷剂流量多联机空调系统(简称“多联机”)的建筑,由于室内机可以直接调节控制,进而影响室外主机的冷热能力、能耗,现有人员行为模型无法反应这些调节特性,导致能耗评估出现偏差.众所周知,多联机安装、维护方便,便于调节控制,占用机房面积小^[9],凭借这些优异特点,多联机在中国得到了迅猛发展,2013年其在商用空调市场占有率已经超过了35%^[10].因此,对于多联机空调的人员行为调节特性需要进一步展开研究.本文首先对上海某办公建筑做数据调研,获取数据样本,对其能耗随开机率的变化特性做统计分析,然后通过数据包络(DEA)方法分析了行为调节的技术效率,最后利用Parzen窗估计概率法得到了技术效率的概率密度分布和累积概率分布,得出了多联机空调系统实际使用过程中有效行为调节发生的概率.

1 多联机行为调节特性

ASHRAE 推荐的人员作息时间表(如图 1 所

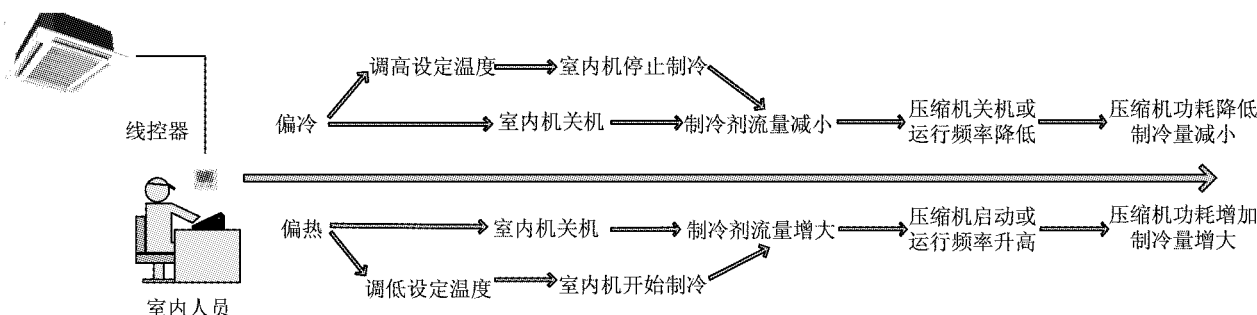


图 2 办公建筑中制冷期间多联机行为调节示意

Fig. 2 Behavior regulating illustration of variable refrigerant flow system in office building during cooling period

根据以上分析,考虑发生动作及对能耗的影响,使用开机率来反应该行为调节特性,其定义如下^[11]:

$$O_{UR} = \frac{q_{on}}{q_{total}} \quad (1)$$

式中: q_{on} 为开启的室内机额定容量之和,kW; q_{total} 为所有室内机额定容量之和,kW.

文献[11-13]对一套1拖4的数码涡旋多联机系统开机率与部分负荷率、能耗之间的变化关系做了大量试验研究,得出了许多有意义的结论,但相关试验的局限性在于:①所有工况都是在实验室测试,②开机率、设定温度等均是实验过程中设定,③测试数据量偏少.因而相关数据不能全面反映人员行为调节对多联机空调的影响.

示)反映了人员在普通办公建筑中的行为特性,但是却无法反映人员对多联机的调节特性.如前所述,多联机与(半)集中式空调的最大区别在于室内人员能够直接控制室内机,进而影响室外主机的冷热能力和能耗,主要体现在室内设定温度和室内机的开关上.如图 2 所示,在制冷期间,当感觉室内偏冷时,调高设定温度直至室内机停止制冷进入吹风模式,多联机控制系统则根据指定动作减小制冷量,从而实现能耗降低,制热期间的调节模式与此类似.因此统计某一段时间内室内机停止制冷的台数(含关机)可以近似得知室内人员对多联机的调节特性.

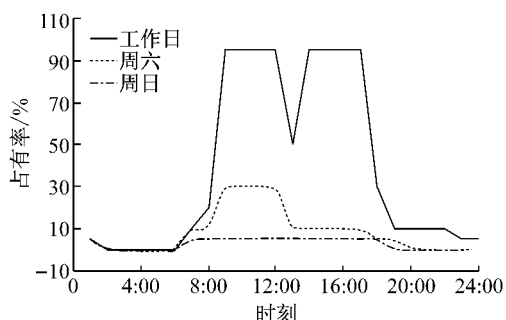


图 1 办公建筑人员逐时在室率推荐值^[3]

Fig. 1 Recommended hourly occupancy factors in office building^[3]

2 数据调研

为能够充分反映人员对多联机的行为调节特性,本文对上海某公司做了调研分析.该公司位于上海某办公建筑的第 8 层,面积 1 520 m²,如图 3 所示.其配备的多联机空调系统共有 4 套,具体参数见表 1,数据记录时间为 2013-07-01—2014-06-30,调研数据中的系统能耗不包括室内机的耗电量.

由图 4 可以看出,7~9 月为制冷季节且能耗较大,12 月和次年的 1~2 月为制热季节,能耗较大,且制热月度最大能耗值为制冷最大月度能耗值的 50%

左右,本文即选取这 6 个月的数据做统计分析.

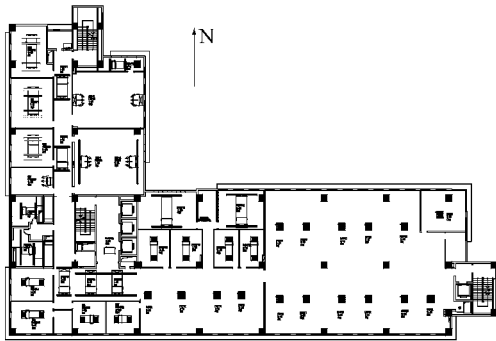


图 3 上海某办公室平面

Fig.3 Layout of office located in Shanghai

表 1 多联机容量

Tab.1 Nominal capacity of variable refrigerant flow units

机组	名义制冷量/kW	名义制热量/kW
A	28.0	31.5
B	78.5	87.5
C	90.0	100.0
D	85.0	95.0

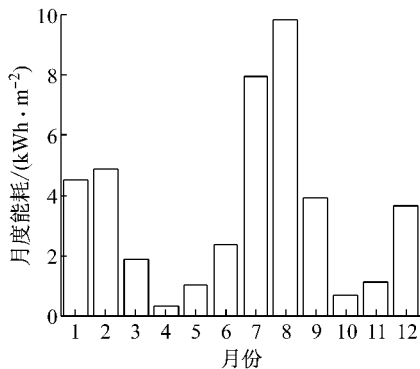


图 4 办公室月度能耗

Fig.4 Monthly energy consumption of the office

3 研究方法

DEA 分析法是一种非参数统计方法,以相对效率为基础,用以评价相同类型投入、产出的多种决策单元(DMU)是否有效,广泛应用于多种学科的研究^[14-15],主要包含全效率、技术效率和规模效率.技术效率在经济学中是指在当前生产规模下企业管理方式、工艺条件、技术水平等可控制、可调节的因素对生产效率的影响程度,规模效率则是指技术效率不变时企业生产规模的变化对生产效率的影响程度,相应的,全效率即为所有因素对生产效率的影响程度.在分析开机率对能耗的影响时,决策单元表示预测能耗为产出、实际能耗数据为投入的情况,对多

联机历史运行数据采用 DEA 方法分析的目的是将影响多联机能耗的行为调节因素和天气因素分别用技术效率和规模效率表示出来.

Parzen 窗概率估计法也是一种非参数函数估计方法^[16],能够利用已知样本对总体分布密度函数进行估计,适用于对复杂分布的样本数据做函数密度分析.范波等^[17-19]使用 Parzen 窗法估计空调负荷的概率密度函数,利用 DEA 方法评价冷水机组不同运行策略对能耗的影响,均取得了较好效果.

DEA 方法原理如图 5 所示,图中 X,Y 分别为投入和产出,点 A~D 处于生产可能的集合边界上,该边界也为变动规模的效率前沿,OI 代表固定规模的效率前沿,点 E 即为决策单元(DMU),其技术效率 E_t 可用如下公式表示:

$$E_t = \frac{L_{FB}}{L_{FE}} \quad (2)$$

式中: L_{FB} , L_{FE} 分别为线段 FB , FE 的长度.

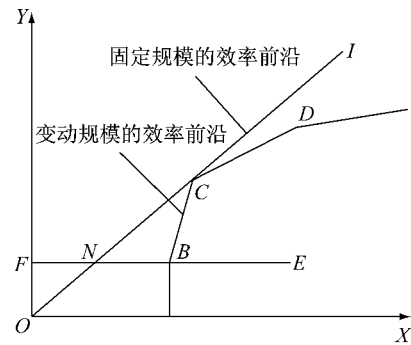


图 5 数据包络决策单元分析示意

Fig.5 Analysis illustration of decision making unit based on data envelopment analysis

Parzen 窗概率估计法原理为,假设 x 为 d 维空间中任意一点,构造以 x 为中心、边长为 h 的超维立方体,样本数据 $\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ 中有 k 个数据点落入该立方体中,则通过 x 处的分布概率 $p(x)$ 的估计公式为

$$\phi\left(\frac{x_i - x}{h}\right) = \begin{cases} 1, & \frac{|x_{ik} - x_k|}{h} \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$p(x) = \frac{k/n}{h^d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h^d} \phi\left(\frac{x_i - x}{h}\right) \quad (4)$$

式中: h 为超维立方体边长; x_i 为第 i 个数据; x 为求解空间中任意一点; x_k 为包含有 k 个数据点的超维立方体中心点; x_{ik} 为对应 x_k 的样本空间第 i 个数据; n 为样本总数; d 为空间维数; $\phi(\cdot)$ 称为窗口函数,特别地,对于一维问题,窗口函数采用高斯概率密度函数时,有下式成立:

$$p(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{h \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{2h^2}\right) \quad (5)$$

4 计算过程及结果分析

根据式(1), O_{UR} 取值范围为 0~1, 为方便对比, 多联机系统的冷热能耗做相应标准化处理, 如式(6)所示^[20]:

$$X = 0.1 + 0.8 \frac{x_j - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

式中: X 为多联机无因次能耗; x_j 为第 j 个多联机能耗样本数据; x_{\max}, x_{\min} 分别为多联机电耗样本数据的最大、最小值。

由图 6a, 6b 可以看出, 制热期间能耗整体近似与开机率呈线性变化, 制冷期间能耗变化稍显复杂, 当制冷开机率小于 50% 时, 能耗变化幅度较小, 此时

说明制冷需求较小, 多联机空调整体上处于较低负荷运行, 其能耗处于较低水平; 当制冷开机大于 50% 时, 与制热期间情形类似, 能耗整体近似与开机率呈指数变化。显然, 在特定开机率下, 无论制冷能耗还是制热能耗均在一定范围内变化, 如图 6a, 6b 中的 AB, CD 所示, 该变化范围即显示了特定开机率下行为调节、天气等因素对能耗的影响程度。图 6c, 6d 分别对各开机率区间内的能耗数据做了统计分析, 各统计区间数据的平均值与中位数均比较接近, 样本数据质量较好。制热期间统计数据各区间样本能耗极差值随开机率增大而增大, 最大值为 0.40 左右, 制冷期间统计数据各区间样本能耗极差值变化稍微复杂, 由于在 30%~50% 开机率范围内样本数据较少, 因而其极差值较之前出现了略微下降并维持在 0.10 左右, 随后随着开机率增大而增大, 最大值为 0.55 左右。

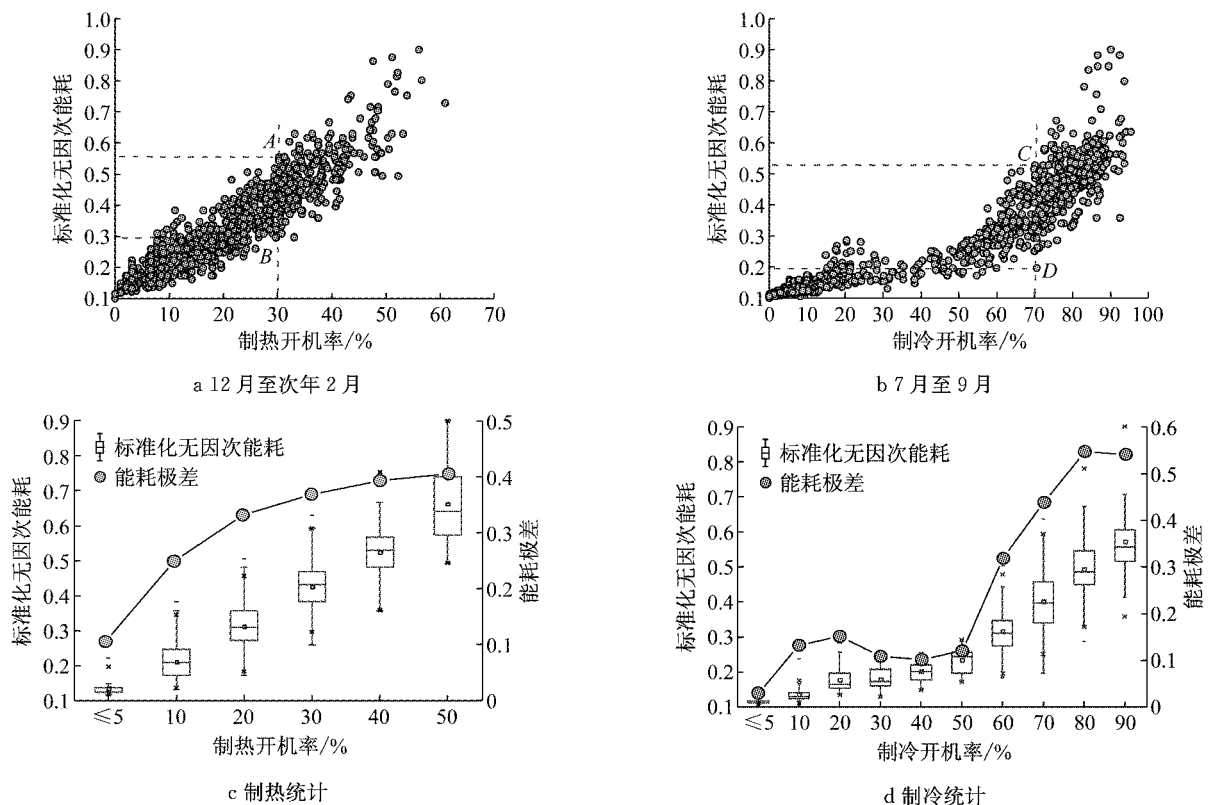


图 6 能耗随开机率变化

Fig.6 Energy consumption variation with operating unit ratio

4.1 制热开机率的行为调节估计

制热开机率统计分布如图 7 所示, 制热最大开机率仅为 60% 左右, 这是因为上海位于夏热冬冷热工设计气候区域, 制热负荷远小于制冷负荷, 图 4 的月度能耗统计也印证了这一点。5% 以下的开机率统计数量最多, 表明在该层办公室中频繁出现 1 台或

数台内机运行。有 2 个可能原因, ①少数人加班期间有制热需求, ②仅有部分靠近外区的办公区域有制热需求。从图中还可知 10%~30% 区间开机率统计数量相似, 60% 以上开机率统计量很小。为深入分析开机率对能耗的影响, 利用预测能耗样本作为目标, 统计样本作为投入^[17,19], 使用 MaxDEA 软件^[21] 求

解技术效率,其中预测多联机无因次能耗使用如下关系式求解:

$$\hat{X} = 1.054 4 \times O_{UR} + 0.1 (R^2 = 0.93) \quad (7)$$

式中: \hat{X} 为多联机无因次能耗; R^2 为确定性系数.

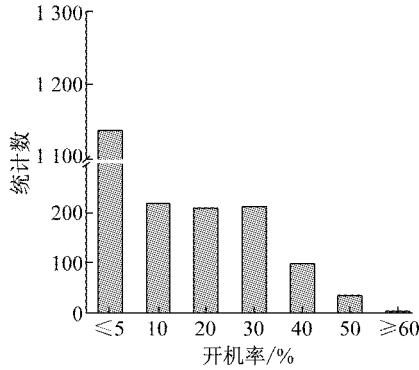


图 7 制热开机率分布统计

Fig. 7 Distribution of operating unit ratio in heating period

图 8 给出了不同开机率下的技术效率分布图,总体趋势是开机率越高技术效率散点越接近 1,代表其对能耗的影响越大.对应的概率密度函数和累积分布函数如图 9 所示,概率密度函数存在 2 个峰值,分别在 0.85 和 0.95 左右,因此取技术效率 $E_t > 0.8$ 时,认为行为调节能够使多联机电耗产生显著的减小或增大,对应发生概率为

$$P(E_t > 0.8) = F(1) - F(0.8) = 1 -$$

$$\sum_{i=1}^N \xi p_i(\xi) = 1 - 0.46 = 0.54 \quad (8)$$

式中: $F(\cdot)$ 为累积概率函数; ξ 为离散区间长度; $p_i(\xi)$ 为各离散点对应的概率密度; N 为离散点 0~0.8 对应的数量总数.

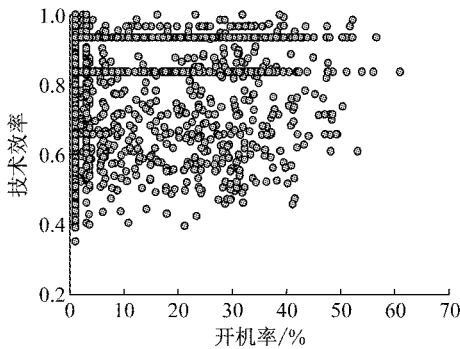


图 8 不同制热开机率下的技术效率分布

Fig. 8 Technical efficiency distribution under different operating unit ratio in heating period

4.2 制冷开机率的行为调节估计

制冷开机率统计分布如图 10 所示,呈现两头

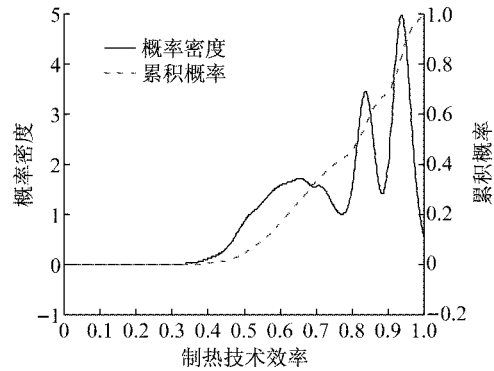


图 9 制热技术效率的概率密度与累积概率分布

Fig. 9 Probability density and cumulative probability distribution of technical efficiency in heating period

高、中间低的特点,与制热期间统计的开机率类似,制冷开机率在 10% 以下统计量相对最多,其次是 80% 区间的开机率数量.和制热过程的分析方法、过程类似,其能耗预测方程如式(9)所示:

$$\hat{X} = 0.110 8 \times e^{1.805 1 \cdot O_{UR}} (R^2 = 0.95) \quad (9)$$

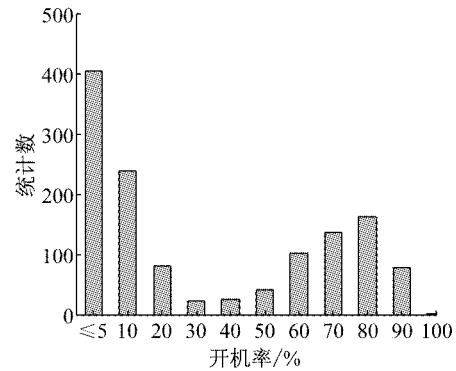


图 10 制冷开机率分布统计

Fig. 10 Distribution of operating unit ratio in cooling period

图 11 给出了不同开机率下的技术效率分布图,与制热期间的技术效率散点分布稍有不同,在较低开机率和较高开机率下,技术效率相对集中.对应的概率密度函数和累积分布函数如图 12 所示,与制热期间的分布类似,概率密度函数也存在 2 个峰值,分别为 0.55 和 0.95 左右.与制热期间评估方法类似, $E_t > 0.8$ 时,认为行为调节能够使多联机电耗产生显著的减小或增大,对应发生概率为

$$P(E_t > 0.8) = F(1) - F(0.8) =$$

$$1 - \sum_{i=1}^N \xi p_i(\xi) = 1 - 0.56 = 0.44$$

$$(10)$$

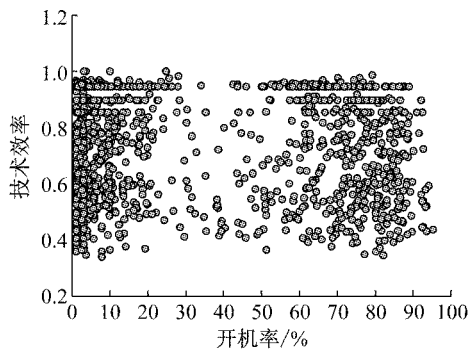


图 11 不同制冷开机率下的技术效率分布

Fig. 11 Technical efficiency distribution under different operating unit ratio in cooling period

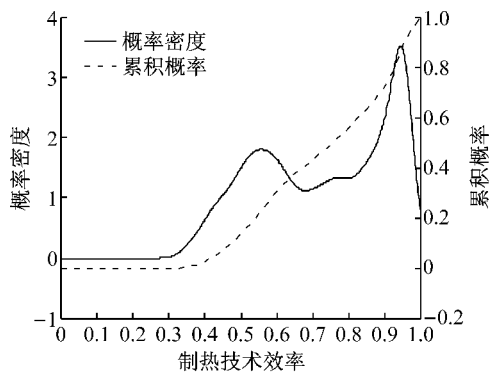


图 12 制冷技术效率的概率密度与累积概率分布

Fig. 12 Probability density and cumulative probability distribution of technical efficiency in cooling period

5 结论

通过对上海某公司使用的多联机系统做数据调研,以开机率表征多联机的行为调节特性,利用数据统计法分析了制冷、制热期间能耗随开机率的变化特性.使用 DEA 法和 Parzen 窗法分离了行为调节因素、天气因素对多联机能耗的影响,使用技术效率表征行为调节,估计了行为调节使多联机能耗产生显著变化的发生概率,相关结论如下:

(1)制热期间多联机系统整体最大开机率为 60%左右,能耗随开机率变化平稳,呈现较强的线性特征.对应制冷期间开机率则在 0~100%之间变化,但 30%~50%之间的数据较少,能耗总体随开机率增加呈指数变化.行为调节可以很好地解释其原因,由于天气炎热,所以开启内机或调低设定温度的行为增多,开机率逐渐增大,使空调负荷增加,多联机系统进入较高负荷区间运行,定频压缩机开启台数增加,变频压缩机以高频率甚至超高频运行,能耗

急剧上升.

(2)在特定开机率下,行为调节因素、天气因素等造成了多联机系统能耗在一定范围内变化,制热期间样本数据统计区间能耗极差最大值为 0.40 左右,制冷期间样本数据统计区间能耗极差最大值为 0.55 左右.

(3)多联机系统制热期间发生行为调节(能够使多联机能耗产生显著的减小或增大)的概率为 0.54,制冷期间发生行为调节的概率为 0.44.

参考文献:

- [1] Huang P, Huang G S, Wang Y. HVAC system design under peak load prediction uncertainty using multiple-criterion decision making technique[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 91: 26.
- [2] Pérez-Lombard L, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(3): 394.
- [3] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1—2013 Energy standard for buildings except low-rise residential buildings[S]. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- [4] DOE. Energyplus [EB/OL]. [2015-08-03]. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1.
- [5] Tsinghua University. Dest [EB/OL]. [2015-09-16]. <http://update.dest.com.cn/zh-cn/index.html>.
- [6] Zhang R, Lam K P, Chiou Y S, Dong B. Information-theoretic environment features selection for occupancy detection in open office spaces[J]. *Building Simulation*, 2012, 5(2): 179.
- [7] Zhao J, Lasternas B, Lam K P, *et al.* Occupant behavior and schedule modeling for building energy simulation through office appliance power consumption data mining[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 341.
- [8] D'Oca S, Hong T. A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices[J]. *Building and Environment*, 2014, 82: 726.
- [9] Aynur T N. Variable refrigerant flow systems: A review[J]. *Energy and Buildings*, 2010, 42(7): 1106.
- [10] Zhao D, Zhang X, Zhong M. Variable evaporating temperature control strategy for VRV system under part load conditions in cooling mode[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 91: 180.
- [11] 张东亮. 数码涡旋多联式空调系统能耗特性与评价方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.
ZHANG Dongliang. Study on energy consumption performance and evaluation method of digital variable multiple air conditioning system[D]. Shanghai: Tongji University, 2012.
- [12] 张旭, 杨刚, 杨洁. 数码涡旋多联式空调系统夏季运行特点及能耗特性的实验研究[J]. *制冷学报*, 2008, 29(2): 14.
ZHANG Xu, YANG Gang, YANG Jie. Experimental research on operation and energy performance of DVM system in summer

- [J]. *Journal of Refrigeration*, 2008, 29(2): 14.
- [13] 朱乐琪,张旭. 数码涡旋多联机空调系统开机率和负荷率与冬季制热能耗特性的关系探讨[J]. *制冷空调与电力机械*, 2007,78(1): 24.
- ZHU Leqi, ZHANG Xu. Discussion on the relations of the indoor-unit operating ratio and load ratio to the energy consumption of DVM system in winter[J]. *Refrigeration Air Conditioning & Electrical Power Machinery*, 2007,78(1):24.
- [14] 苏月霞. 对我国商业银行技术效率和规模效率的 DEA 分析[J]. *市场论坛*, 2006,33(12): 85.
- SU Yuexia. DEA Analysis of technical efficiency and scale efficiency for commercial bank in China[J]. *Market Forum*, 2006,33(12):85.
- [15] 李美娟,陈国宏. 数据包络分析法(DEA)的研究与应用[J]. *中国工程科学*,2003,5(6):88.
- LI Meijuan, CHEN Guohong. A review on the research and application of DEA[J]. *Engineering Science*, 2003,5(6):88.
- [16] Parzen E. On the estimation of a probability density function and the model[J]. *Annals of Math Statistics*, 1962, 33(3): 1065.
- [17] 范波. 基于能流分析的空调系统运行和控制水平评估方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2014.
- FAN Bo. Study on operation and control level evaluation method of HVAC system based on analysis of energy-flow[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [18] 范波,晋欣桥,杜志敏,等. 基于 Parzen 窗估计概率率的空调系统能耗研究[C]//上海市制冷学会 2009 年学术年会. 上海:上海市制冷学会, 2009: 507-510.
- FAN Bo, JIN Xinqiao, DU Zhimin, *et al.* Study on energy consumption of air condition system based on parzen window density estimation method[C]// Annual academic conference of Shanghai Society of Refrigeration in 2009. Shanghai: Shanghai Society of Refrigeration, 2009:507-510.
- [19] 方兴,晋欣桥,范波,等. DEA 方法在评价冷水机组运行水平上的应用[C]//2013 中国制冷学会学术年会. 武汉:中国制冷学会, 2013:51.
- FANG Xing, JIN Xinqiao, FAN Bo, *et al.* DEA method applied in assessment of chiller system's operating level[C]// Annual academic conference of Chinese Association of Refrigeration in 2013. Wuhan: Chinese Association of Refrigeration, 2013:51.
- [20] 李琼,孟庆林,吉野博,等. 基于支持向量机的建筑物空调负荷预测模型[J]. *暖通空调*, 2008,38(1): 14.
- LI Qiong, MENG Qinglin, Hiroshi Yoshino, *et al.* Building air conditioning load prediction model based on support vector machine[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2008, 38(1): 14.
- [21] 成刚. 数据包络分析方法与 MaxDEA 软件[M]. 北京:知识产权出版社,2014.
- CHENG Gang. Data envelopment analysis: Methods and MaxDEA software. Beijing: Intellectual Property Publishing House Co., Ltd., 2014.

~~~~~

(上接第 914 页)

- [6] Shabaka A I, ElMaraghy H A. A model for generating optimal process plans in RMS[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2008, 21(2): 180.
- [7] Wang W, Koren Y. Scalability planning for reconfigurable manufacturing systems[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2012, 31(2): 83.
- [8] ElMaraghy H A. Reconfigurable process plans for responsive manufacturing systems[C]// *Digital Enterprise Technology*. Boston: Springer US, 2007:35-44.
- [9] Azab A, ElMaraghy H A. Mathematical modeling for reconfigurable process planning [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 467.
- [10] Putnik G, Sluga A, Elmaraghy H, *et al.* Scalability in manufacturing systems design and operation: State-of-the-art and future developments roadmap [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(2):751.
- [11] 楼洪梁,杨将新,林亚福,等. 单零件族可重构制造系统的生产能力优化设计[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(2):125.
- LOU Hongliang, YANG Jiangxin, LIN Yafu, *et al.* Optimal capacity design of reconfigurable manufacturing system for single part family[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(2):125.
- [12] 楼洪梁,杨将新,林亚福,等. 双零件族随机环境下可重构制造系统的生产能力设计[J]. *计算机集成制造系统*, 2007, 13(1):13.
- LOU Hongliang, YANG Jiangxin, LIN Yafu, *et al.* Capacity design of RMS for double product families under stochastic demand [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2007, 13(1):13.
- [13] Aguilar A, Roman-Flores A, Huegel J C. Design, refinement, implementation and prototype testing of a reconfigurable lathe-mill[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2013, 32(2):364.
- [14] 段建国,李爱平,谢楠,等. 可重构制造系统生产能力扩展性重构方法[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2012, 40(9): 1357.
- DUAN Jianguo, LI Aiping, XIE Nan, *et al.* Reconfiguration method on production capacity expansion in RMS [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 40(9):1357.
- [15] 韩学东,洪炳熔,孟伟. 基于疫苗自动获取与更新的免疫遗传算法[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(5): 740.
- HAN Xuedong, HONG Bingrong, MENG Wei. An immune genetic algorithm based on vaccine autonomous obtaining and updating[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(5): 740.