

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.025

空调系统运行性能 ELECTRE 多属性评价

杨学宾, 晋欣桥, 杜志敏, 祝用华, 范波, 方兴

(上海交通大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200240)

摘要:提出了空调系统运行性能 ELECTRE 评价模型。性能评价准则考虑了运行能耗、热舒适性 PMV 和 PPD、室内空气品质指标 CO₂ 浓度和 TVOC 浓度等 5 个指标。在 TRNSYS(Transient system)空调系统仿真平台上,以 7 种不同运行工况为例,对空调系统运行性能进行多属性优劣排序。采用 3 种不同权重方案分别计算各方案的级别优先得分。结果表明,评价模型能够对不同运行工况下的性能进行多属性优劣排序,以选择出最优方案。不同的权重赋值对研究中的性能优劣排序结果影响不大。以后的研究应考虑诸如控制系统执行性能等更多指标的空调系统运行性能综合评价。

关键词:空调系统;评价;多属性;优劣排序;ELECTRE;运行性能

中图分类号:TU831.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)01-0153-05

Electre Multi-Attribute Evaluation Model to the Operating Performance of Air Conditioning Systems

Yang Xuebin, Jin Xinqiao, Du Zhimin, Zhu Yonghua, Fan Bo, Fang Xing

(Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China)

Abstract:An ELECTRE performance evaluation model was developed to outrank the different operating conditions of air conditioning systems. Five evaluation criteria covers total energy consumption, thermal comfort PMV and PPD, indoor air quality indices such as CO₂ concentration and TVOC concentration. The performance under seven different operating conditions was outranked on the TRNSYS (transient system) simulation platform. Three assignment alternatives of weight coefficients were selected to calculate the relevant credibility scores respectively. The results indicate that the proposed evaluation model can outrank the different operating conditions and select the optimum one, Moreover different weight assignments have little influence on the outranking scores. Further investigation should focus on the more evaluating criteria such as control performance and others in the comprehensive evaluation of operating conditions.

Key words:air conditioning system; evaluation; multiple attributes; outrank; ELECTRE; operating performance

空调系统中,提高室内空气品质最简便的方法是引进新风,但是为了保证室内的热舒适性,大量新风有可能会大大提高了空调系统的能耗。空调系统运行性能的评价是一个矛盾的结合体,在提高某个

指标的同时,可能引起另一个指标性能的下降。因此,如何综合评价运行能耗、热舒适指标和室内空气质量是一件非常困难的事情。

对于空调系统优化运行的控制策略^[1],设备的

收稿日期:2012-06-18

基金项目:国家自然科学基金(50976066);国家自然科学基金青年基金(51006066)

作者简介:杨学宾(1977-),男,博士生,主要从事建筑空调系统故障诊断与优化控制研究,(E-mail)xbyang@sjtu.edu.cn。
晋欣桥(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)xqjin@sjtu.edu.cn。

故障检测与诊断^[2], 运行调试^[3]等情况时, 必须对空调系统不同工况下的运行性能做出多属性评价, 以进行比较判断。Avgelis 等^[4]采用能耗、房间热舒适性、室内空气品质以及净现值等指标对空调系统性能进行评价, 以选出最优的建筑空调系统方案。Blondeau 等^[5]采用舒适性指标 PMV (predicted mean vote) 和 PPD (predicted percentage dissatisfied)、室内空气品质和经济性等指标来评价建筑空调系统, 以选择最佳通风控制策略。Jreijiry 等^[6]采用室内空气品质、热舒适性、能耗、有效控制时间等评价系统运行情况, 选择最合理的通风控制策略。

多属性评价方法可分为函数模型法和关系模型法两类。常见的函数模型法有多属性效用理论、层次分析法等^[7]。与函数模型法不同, 关系模型法从属性之间的优先排序出发, 利用级别优先关系或者优先函数来对方案进行优选、排序或者分类。常见的级别优先关系构造法有 ELECTRE (elimination et choice translating reality) 和 PROMETHREE (preference ranking organization methods for enrichment evaluation) 法等^[8-9]。作为一种典型的级别优先关系模型法, ELECTRE 法是目前欧洲较为流行的方法。

本文采用 ELECTRE 法, 对不同运行工况下空调系统的运行性能进行了评价, 综合考虑了运行能耗、热舒适指标 PMV 和 PPD、室内空气品质指标

CO₂ 浓度和 TVOC (total volatile organic compounds) 浓度等 5 个准则指标。结合运行规律与现有研究成果, 对无差别、优先和否决 3 个阈值进行了赋值。权重准则分别采用了 3 种方案, 以送风温度传感器不同固定偏差故障等 7 种运行工况为例, 对运行性能进行优劣排序。

1 ELECTRE III 算法

ELECTRE III 算法可用于离散问题的排序, 以此可进行多方案多属性的决策或评价。假设存在 m 个方案构成方案集 $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_m\}$, n 个准则构成准则集 $G = \{g_1, \dots, g_j, \dots, g_n\}$ 。 $g_j(a_i)$ 定义为方案 a_i 的评价准则 g_j 。 ELECTRE III 方法中引入了 3 个阈值和 1 个权重: 无差别阈值 $q_j(g_j)$ 、优先阈值 $p_j(g_j)$ 、否决阈值 $v_j(g_j)$ 、权重 $w_j(g_j)$ 。对于 2 个属性指标 a 和 b 满足 $(a, b) \in A$, 存在以下级别优先关系:

- 1) a 强优于 b 时, 满足 $aPb \Leftrightarrow g(a) - g(b) > p$;
- 2) a 较优于 b 时, 满足 $aQb \Leftrightarrow q < g(a) - g(b) \leq p$;
- 3) a 和 b 无差别时, 满足 $aIb \Leftrightarrow |g(a) - g(b)| \leq q$ 。

对于所有 $j \in J$, 局部和谐指标 $c_j(a, b)$ 可采用下式^[10]

$$c_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(a) + p_j(g_j(a)) \leq g_j(b) \\ 1, & \text{if } g_j(a) + q_j(g_j(a)) \geq g_j(b) \\ \frac{g_j(b) - (g_j(a) + p_j(g_j(a)))}{q_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $c_j(a, b)$ 为局部和谐指标; $g_j(a)$ 为方案 a 的评价准则 g_j ; $g_j(b)$ 为方案 b 的评价准则 g_j ; $p_j(g_j)$ 为优先阈值; $q_j(g_j)$ 为无差别阈值。

假定 w_j 为权重因子, 全局和谐指标

$$c(a, b) = \frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j} \sum_{j=1}^n w_j c_j(a, b) \quad (2)$$

$$d_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{if } g_j(b) - g_j(a) \leq p_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - (g_j(a) + p_j(g_j(a)))}{v_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))}, & \text{if } p_j(g_j(a)) < g_j(b) - g_j(a) < v_j(g_j(a)) \\ 1, & \text{if } g_j(b) - g_j(a) \geq v_j(g_j(a)) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d_j(a, b)$ 为局部不和谐指标; $v_j(g_j(a))$ 为否决阈值。

基于和谐指数和非和谐指数, 可计算论断 $a > b$ (或写为 aSb) 的可信度得分。

式中: $c(a, b)$ 为全局和谐指标; w_j 为权重因子。

对于规范化权重, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$, 因此式(2)可改写为

$$c(a, b) = \sum_{j \in J} w_j c_j(a, b) \quad (3)$$

对于所有 $j \in J$, 局部不和谐指标 $d_j(a, b)$ 可采用下式计算。

$$S(a, b) = \begin{cases} c(a, b) \prod \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - c(a, b)}, & j \in J: d_j(a, b) > c(a, b) \\ c(a, b), & \text{if } \max\{d_j(a, b)\} \leq c(a, b) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S(a, b)$ 为可信度得分。

由式(5)可以看出,当 $d_j(a, b) = 1$ 时,对于任意 $j \in J$, $S(a, b) = 0$ 。级别优先关系的挖掘采用净优势法(net advantage value, NAV)^[11-12],可通过下式来计算:

$$\delta_{a_i} = \sum_{k=1, k \neq i}^m S(a_i, a_k) - \sum_{k=1, k \neq i}^m S(a_k, a_i), i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

式中 δ_{a_i} 为方案 a_i 的级别优先得分。得分越高,满意度越高。

2 评价准则

如图 1 所示,空调系统运行性能的评价准则采用 5 个指标。1)能耗;2)CO₂ 浓度;3)TVOC 浓度;4)PMV 值;5)PPD 值。能耗指标采用空调系统的机组能耗、风机能耗和水泵能耗三者之和。室内空气 CO₂ 浓度、TVOC 浓度、热舒适性 PMV 值和 PPD 值等 4 个指标采用运行 1 d 的平均值。

ELECTRE III 算法中,通常假定所有的准则满足效益型。因此对于正数的成本型准则,在其前加负号变为负数,由此转变成效益型。5 个准则指标中,能耗、CO₂ 浓度、TVOC 浓度、PPD 值等 4 个均为成本型。鉴于 PMV 值中有正有负,如果取其绝对值,满足成本型条件。因此对 5 个准则进行处理时,统一转化为负数,即转变为效益型准则。

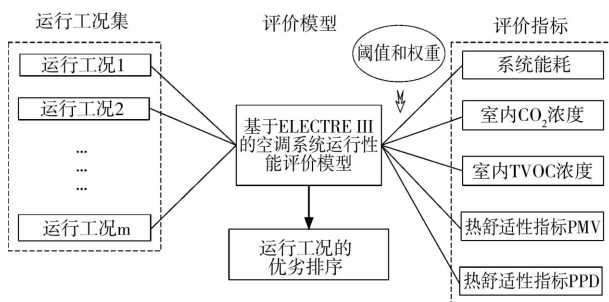


图 1 ELECTRE 法空调系统运行性能优劣排序模型

3 空调系统及仿真平台

某办公建筑空调系统及其送风温度控制系统如图 2 所示。主要包括 4 部分:冷冻水循环,空气循环,送风温度控制回路和按需通风控制回路(demand controlled ventilation, DCV)。空气循环采用固定新风与循环风混合的方式。对于夏季相对湿度较大的某地区办公建筑空调系统,混合空气由冷却盘管中的冷冻水进行减湿冷却,直至其温度接近或

达到送风温度设定值。处理后的空气由风机经空调末端送到各个空调区域,以满足空调区域的舒适性要求。

送风温度传感器的测量信号分别输送给送风温度控制回路和按需通风控制回路。送风温度控制回路主要由温度传感器、PID 控制器和执行器(冷冻水阀)3 部分组成。送风温度控制器对测量信号与温度设定值进行比较后,给出指令输入到水阀执行器。通过改变水阀开度调节水流量,来改变水与空气通过冷却盘管的换热量,从而调整送风温度接近或达到设定值。按需通风控制器通过比较温度、CO₂ 浓度等传感器的测量值与设定值,调节新风阀、循环风阀和排风阀 3 个阀门的开度,以调节送风量的大小。

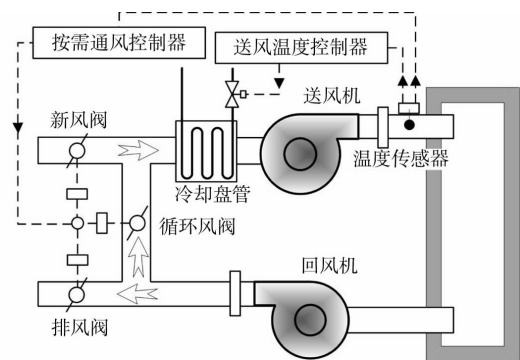


图 2 某办公建筑空调系统及送风温度控制回路简图

基于 TRNSYS(transient system)仿真平台开发的办公建筑空调系统仿真模型^[1, 13],通过现场实测数据验证后,能够很好的反映实际系统的运行状况。该模型根据质量和能量平衡,建立空调冷却盘管水侧和风侧的 2 个质量守恒方程,以及冷水、盘管、空气的 3 个换热方程^[14]。空调系统不同运行工况的获取,通过在温度传感器中引入不同大小的故障来实现。在 TRNSYS 仿真平台中,嵌入一个故障发生器^[2],在特定时刻对传感器测量值中引入故障信号。送风温度传感器一旦发生故障,将影响送风温度和按需通风 2 个控制回路。

记录工作日 08:00-20:00 的运行数据进行分析。测量数据每隔 10 min 记录 1 次,这样 1 h 内可得到 6 个观测值。1 个工作日可得到 73 组测量数据。空调系统运行参数的设定值如表 1 所示。选取夏季某天室外干球平均温度为 30 °C 的气象参数进行计算。7 种运行工况分别为无故障和 6 种不同固定偏差故障: -30%、-20%、-10%、+10%、+20%、+30%。送风温度测量值和实际值随时间的变化曲线如图 3 所示。由图中可以看出,由于控

制器对冷冻水阀的控制调节作用,包含故障信号的传感器测量值维持在设定值附近。测量值为实际值与故障值之和。负偏差故障时,实际值大于测量值;正偏差故障时,实际值小于测量值。

表 1 空调系统运行参数设定值

运行参数	房间温度/ ℃	冷水供水温度/ ℃	送风压力/ Pa	送风温度/ ℃
设定值	24	7	650	14

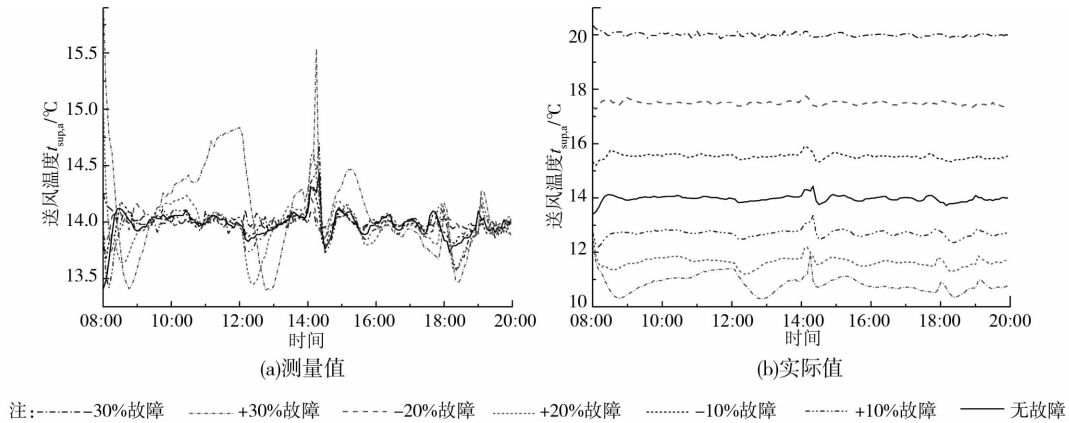


图 3 送风温度测量值与实际值随时间的变化

4 系统运行性能

7 种不同运行工况时 4 种评价准则随时间的变化曲线如图 4 所示。 CO_2 浓度值总体维持在 $650 \times 10^{-6} \sim 1\ 200 \times 10^{-6}$ 之间。并且, CO_2 浓度值随着负偏差故障的增大而减小, 而随着正偏差故障的增大而增大。

主要原因是,送风温度传感器故障为负偏差时,实际温度大于测量值,为了达到室内温度设定值,DCV 控制策略需要增大送风量才能达到空调区域的温度要求。这样,DCV 控制器输出增大新风阀开度的指令。由此带来了较大的新风量,室内 CO_2 浓度减小。正偏差故障时的情况恰恰相反。

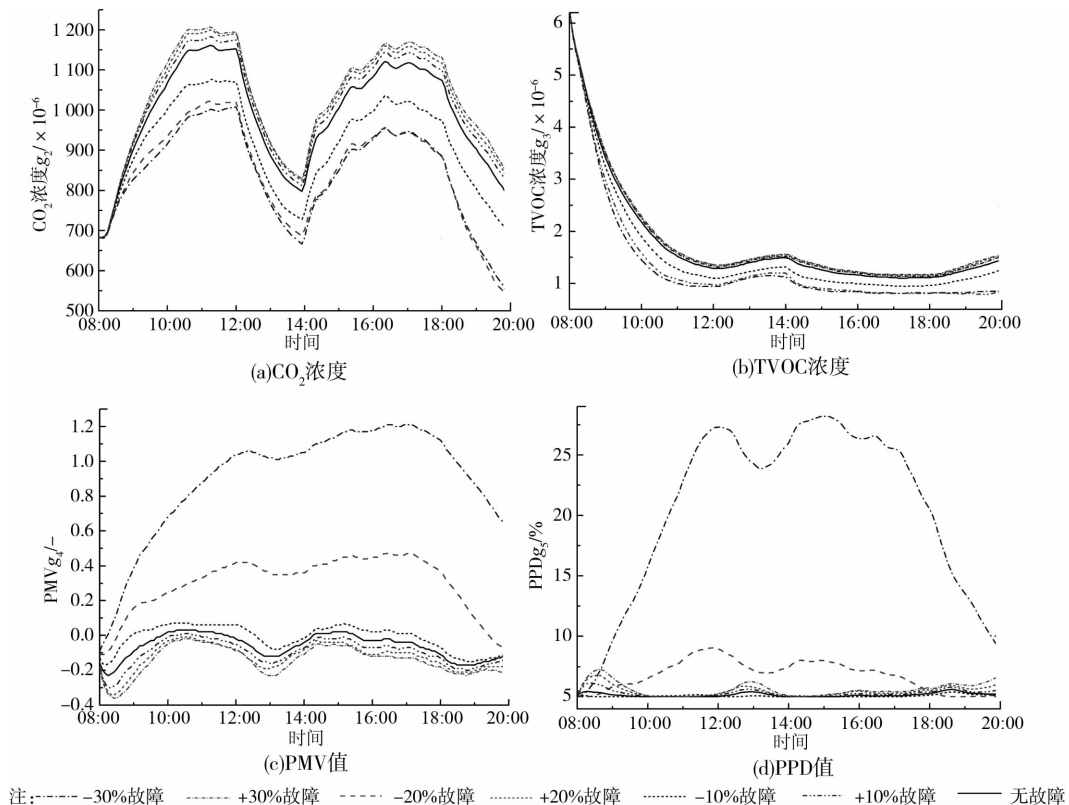


图 4 空调系统运行性能参数随时间的变化

如图 4(b)所示,室内空气 TVOC 浓度在 08:00 开机时最大。随着不断引进室外新风,TVOC 浓度逐渐减小,在空调运行 3 h 后的 11:00 时刻,基本维持在 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 之间。由于存在送风温度传感器故障,导致负偏差故障时,送风量和新风量较大,相应的 TVOC 浓度较小。而正偏差故障时,新风量较小,对应的 TVOC 浓度较大。

由图 4(c)可以看出,送风温度传感器正故障偏差时,对空调区域 PMV 值的影响较小。在 08:00—20:00 整个时段,PMV 值基本维持在 $-0.4 \sim 0$ 之间。而负偏差故障时影响较大,尤其是当负故障偏差为 -20% 和 -30% 时。图 4(d)中,送风温度传感器故障对 PPD 的影响规律与 PMV 非常类似。当 -30% 负故障偏差时,在 11:00—17:00 的时间段内,PPD 值在 25% 附近。

进行 ELECTRE III 性能评价时,能耗取一天的总运行能耗,热舒适性指标 PMV 和 PPD,室内空气指标 CO_2 浓度和 TVOC 浓度均采用平均值,结果如

表 2 所示。

5 优劣排序结果

对于 5 种评价准则,根据不同工况时的运行规律,结合现有文献^[4-5, 15]的研究,适当选取体现不同工况间无差别、优先和否决时的阈值。表 3 所示空调系统运行性能评价 ELECTRE III 相应准则的阈值和权重赋值。定义最重要的准则,其权重系数为 1;重要性次之的,其权重系数为 0.75;重要性最弱的,其权重系数为 0.5。权重准则采用 3 种方案:

1) CO_2 浓度和 PMV 为最重要的指标,赋值 1;运行能耗次之,赋值 0.75;TVOC 浓度和 PPD 最弱,赋值 0.5。

2) 运行能耗最重要,赋值 1; CO_2 浓度和 PMV 次之,赋值 0.75;TVOC 浓度和 PPD 最弱,赋值 0.5。

3) 运行能耗、 CO_2 浓度和 PMV 为最重要的指标,赋值 1;TVOC 浓度和 PPD 次之,赋值 0.75。

表 2 送风温度传感器故障时空调系统运行性能

运行工况	运行能耗 g_1/kWh	CO_2 浓度 $g_2/10^{-6}$	TVOC 浓度 $g_3/10^{-6}$	热舒适性 PMV $g_4/-$	热舒适性 PPD $g_5/\%$
-30%故障	1 315	834	1.41	0.89	20.22
-20%故障	1 471	841	1.45	0.29	6.75
-10%故障	1 379	909	1.63	-0.01	5.08
无故障	1 287	984	1.81	-0.06	5.16
+10%故障	1 264	1005	1.86	-0.10	5.30
+20%故障	1 260	1018	1.88	-0.12	5.47
+30%故障	1 262	1026	1.89	-0.14	5.64

表 3 空调系统运行性能 ELECTRE III 评价法中的阈值和权重赋值

评价准则 g_i	无差别阈值 q_i	优先阈值 p_i	否决阈值 v_i	权重准则 w_i		
				方案 1	方案 2	方案 3
运行能耗 $g_1/(\text{kWh})$	20	50	80	0.75	1	1
CO_2 浓度 $g_2/10^{-6}$	20	50	80	1	0.75	1
TVOC 浓度 $g_3/10^{-6}$	0.1	0.3	0.5	0.5	0.5	0.75
热舒适性 PMV $g_4/-$	0.1	0.3	0.5	1	0.75	1
热舒适性 PPD $g_5/\%$	0.1	0.3	0.5	0.5	0.5	0.75

空调系统运行性能优劣排序结果如表 4 所示。表中“1”表示最优,“7”表示最劣,中间依次类推。虽然采用了 3 种不同的权重方案,但是所得的优劣排序结果大致不变,只有在权重方案 2 时,+10%和+20%两种故障的排序出现不同。表明此种情况下,权重的变化对 7 种不同运行工况的优劣排序结果影响不大。

总的来看,无故障运行时的性能最优,发生故障后,在故障偏离程度接近的情况下,正偏差故障的运行性能要优于负偏差故障。由于选取的气象参数为室外平均温度为 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 的夏季某天,说明在该气象条件下,空调系统的最优运行性能所对应的运行工况即为送风温度设定值 $14\text{ }^\circ\text{C}$ 附近。

表 4 空调系统运行性能优劣排序结果

送风温度传感器故障	-30%	-20%	-10%	无故障	+10%	+20%	+30%
权重方案 1							
级别得分 δ_a	-0.888 2	-1.655	0.464	1.343 4	0.548 3	0.5389	-0.351 5
排序结果	6	7	4	1	2	3	5
权重方案 2							
级别得分 δ_a	-1.017 9	-1.898 6	0.399 1	1.349 7	0.642 9	0.723 8	-0.199
排序结果	6	7	4	1	3	2	5
权重方案 3							
级别得分 δ_a	-0.925 2	-1.732 5	0.440 3	1.406 9	0.606 7	0.567 2	-0.363 4
排序结果	6	7	4	1	2	3	5

6 结 语

空调系统运行性能 ELECTRE III 评价模型,能够对多个运行方案进行优劣评价。研究中以送风温度传感器不同固定偏差故障为例,对相应不同运行工况的性能进行优劣排序。该评价模型完全适用于不同优化运行控制策略时的运行性能优劣评价,以及系统运行调试时选择最佳的系统运行方案等。

1)通过对不同权重赋值方案的级别优先得分结果比较,权重的选取对本研究中的优劣排序结果影响较小。

2)ELECTRE 法中阈值和权重的赋值,应尽量考虑客观因素的影响,从现有数据中挖掘能够体现准则内或准则间差异的客观因素,从而避免人的主观因素过多或完全主宰评价结果。

3)不同的目标要求,多属性准则和模型参数的选取差别很大。对于空调系统运行性能的综合评价,以后的研究还应考虑其他因素的影响,如控制系统的执行性能,对室外环境的影响,以及投资成本和运行成本等指标。

参考文献:

- [1] Yang X B, Jin X Q, Du Z M, et al. Evaluation of four control strategies for building VAV air-conditioning systems[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2/3): 414-422.
- [2] Yang X B, Jin X Q, Du Z M, et al. A novel model-based fault detection method for temperature sensor using fractal correlation dimension[J]. Building and Environment, 2011, 46(4):970-979.
- [3] Visier J C. Commissioning tools for improved energy performance[R]. International Energy Agency, 2004.
- [4] Avgelis A, Papadopoulos A M. Application of multicriteria analysis in designing HVAC systems[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(7):774-780.
- [5] Blondeau P, Sp R M, Allard F. Multicriteria analysis of ventilation in summer period [J]. Building and

Environment, 2002, 37(2):165-176.

- [6] Jreijiry D, Husaunndee A, Inard C. Numerical evaluation of hybrid ventilation control strategies [C]// In Ninth International IBPSA Conference, Montréal, Canada, 2005.
- [7] Zhou P, Ang B W, Poh K L. Decision analysis in energy and environmental modeling: An update [J]. Energy, 2006, 31(14):2604-2622.
- [8] Salminen P, Hokkanen J, Lahdelma R. Comparing multicriteria methods in the context of environmental problems [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 104(3):485-496.
- [9] Haurant P, Oberti P, Muselli M. Multicriteria selection aiding related to photovoltaic plants on farming fields on Corsica island: A real case study using the ELECTRE outranking framework[J]. Energy Policy, 2011, 39(2):676-688.
- [10] Marzouk M M. Electre III model for value engineering applications[J]. Automation in Construction, 2011, 20(5):596-600.
- [11] Zhang T, Yuan J, Kong Y H. An approach based on AHP/ELECTRE III for decision-aid in power distribution system planning [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11):121-127.
- [12] Pirlot M. A characterization of Min as a procedure for exploiting valued preference relations and related results [J]. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, 1995, 4:37-56.
- [13] Du Z M, Jin X Q, Yang X B. A robot fault diagnostic tool for flow rate sensors in air dampers and VAV terminals[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(3):279-286.
- [14] 杨学宾, 晋欣桥, 杜志敏, 等. AHU 送风温度变化特性的分形关联维数分析[J]. 机械工程学报, 2011, 47(2):149-153.
- [15] Roulet C A, Flourentzou F, Labben H H, et al. A multicriteria rating methodology for buildings [J]. Building and Environment, 2002, 37(6):579-586.