

基于模糊综合评价的户式空调系统 优选方案评估方法

赵雯雯, 龚家俊, 黄志甲, 江竹轩

(安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 针对户式空调系统性能常用评价方法存在评价指标不全面、评价过程复杂及评价结果主观性强等不足, 提出1种户式空调系统性能模糊综合评价方法。考虑空调行业绿色低碳的发展要求, 在原有评价指标的基础上增加室外环境及技术特性相关指标, 采用层次分析法建立户式空调系统性能评价指标体系, 采用专家调查法和信息熵法分别对指标权重进行赋值和修正, 采用分布函数法和等级比重法分别对定量和定性指标进行隶属度计算, 最后进行模糊综合评价。以多联机和热湿分控2种典型户式空调系统为例, 分别采用层次分析法和本文方法进行评价, 验证本文方法的科学合理性。结果表明: 2种评价方法对多联机和热湿分控方案的综合评定等级均为Ⅱ级, 对于层次分析法, 综合评价价值分别为53.72, 53.43, 2种方案的评价结果几乎一致, 2种方案没有明显优劣, 难以为空调选型提供参考; 对于本文方法, 2种方案的评价结果差值明显, 可为空调选型提供参考, 这是因为本文方法的评价指标更全面, 且在模糊评价法和信息熵法的作用下完成复杂问题的量化, 可弥补评价过程复杂和评价结果主观性强的不足。

关键词: 户式空调系统; 模糊综合评价; 层次分析法; 信息熵法; 绿色低碳

中图分类号: TU 831 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671-7872.23175



An Evaluation Methods for Preferred Residential Air Conditioning System Based on Fuzzy Comprehensive Assessment

ZHAO Wenwen, GONG Jiajun, HUANG Zhijia, JIANG Zhuxuan

(School of Architecture Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: In view of the shortcomings of common evaluation methods for evaluating residential air conditioning systems, such as incomplete evaluation indicators, complex evaluation processes, and subjective evaluation results, a fuzzy comprehensive evaluation method for residential air conditioning system performance was proposed. Considering the green and low-carbon development requirements of the air conditioning industry, additional indicators related to the outdoor environment and technical characteristics were included in the original evaluation indicators. The analytic hierarchy process (AHP) was used to establish performance evaluation index system for residential air conditioning systems. The expert survey method and information entropy method were used to assign and revise the weights of the indicators, respectively. The distribution function method and grade proportion method were used to calculate the membership for quantitative and qualitative indicators, respectively. Finally, the fuzzy

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478001); 安徽省大学生创新创业计划项目(S202210360242X)

作者简介: 赵雯雯(1999—), 女, 安徽合肥人, 硕士生, 主要研究方向为建筑节能与绿色建筑技术。

通信作者: 黄志甲(1963—), 男, 安徽安庆人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为建筑节能与绿色建筑技术。

引文格式: 赵雯雯, 龚家俊, 黄志甲, 等. 基于模糊综合评价的户式空调系统优选方案评估方法[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2024, 41(6):646-654.

comprehensive evaluation was carried out. Taking two typical residential air conditioning systems, namely multi-split and temperature-humidity independent control systems, as examples, evaluations were conducted using both by AHP and the method proposed in this paper to verify the scientific rationality of the proposed method. The results show that the comprehensive evaluation grade of the two evaluation methods for multi-split systems and temperature-humidity independent control systems are both grade II. For the AHP, the comprehensive evaluation values are 53.72 and 53.43, respectively, showing almost identical evaluation results for the two solutions, indicating no obvious superiority or inferiority, and making it is difficult to provide references for the air conditioner selection. In contrast, the evaluation results using the method proposed in this paper show a significant difference, providing useful references for the air conditioner selection. This is because the evaluation indexes used in this paper are more comprehensive, and the quantification of complex problems are completed under the function of fuzzy evaluation method and information entropy method, which can make up for the shortcomings of complex evaluation process and strong subjective evaluation results.

Keywords: residential air conditioning system; fuzzy comprehensive evaluation; analytic hierarchy process; information entropy method; green and low-carbon

中国是全球最大的空调生产市场和消费市场,随着居民生活水平的提升及城镇化进程的加快发展,空调产品的需求持续增长。户式空调系统是1种结合中央空调送风效果和分体式空调使用功能的空调系统,是现代家庭和办公空间的重要组成部分,其性能直接关系到住宅和办公场所的舒适度和节能性。为确保系统性能和效率达到最佳状态,户式空调系统的设计选型需要综合考虑室内外机的选型、数量、安装位置以及管路设计等诸多因素。随着全球对气候变化和环境保护的关注日益加深,空调行业正在通过技术创新和产品升级,积极响应“双碳”目标,推动经济社会向绿色低碳转型。因此,综合考虑绿色低碳的发展要求,研究户式空调系统优选方案评估方法对于进一步提升用户体验、促进空调行业高效节能发展具有重要意义。

在空调系统发展的初期,主要使用单因素方法评价空调系统的某项性能^[1-2],这种方法评价结果单一,忽略了空调系统的其他性能。为克服单因素评价方法的不足,综合评价方法应运而生,综合评价方法主要有层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[3]、主成分分析法(principal component analysis, PCA)^[4]、多目标决策分析法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)^[5]等20多种,其中最常用的为层次分析法,层次分析法是1种将评价对象层次化、数据化的分析方法。王豆豆等^[6]利用层次分析法分析空调系统的各种资源消耗值和环境影响潜值,对大型空调系统进行能源高效利用评价。这种方法计算过程简单、结果稳定,但是评价过程回避了复杂事物的量化问题,评价结

果的主观性强且较为粗糙。空调系统评价方法的有效性直接依赖于具体评价指标系统设计的科学性与合理性。刘涛等^[7]从户式中央空调结构本身出发,提出采用压缩机变频技术和太阳能技术相结合方式对系统进行节能降耗;Zhang等^[8]以室内环境(温度、相对湿度、风速)、个人因素和主观反应(热感觉投票、热舒适投票、热可接受性投票、不满意百分比)为评价指标,对某超高层建筑中央空调系统进行评估;吕浩^[9]以初投资、年运行能耗、年运行费用、年节约能耗、年节约费用为评价指标,选用静态回收年限法和动态回收年限法对4种热湿分控空调方案进行经济性对比评价。综上,现有研究对于户式中央空调系统性能评价指标主要集中于节能性、室内环境、经济性等方面。但是,户式空调在运行过程中会消耗能源,破坏臭氧层,产生的二氧化碳等温室气体加剧全球气候变暖^[10-12];灰尘、腐蚀等因素也会影响空调的性能,甚至使空调出现故障。而现有评价较少考虑室外环境的影响和系统的技术特性。

信息熵法是1种综合考虑各因素来计算综合指标的数学方法,在不改变原指标权重的前提下,以熵值为修正值对原权重进行修正,使新权重更客观^[13-14];模糊评价法是通过隶属度分析,将定性评价的事物进行定量分析,可解决模糊复杂事物的量化问题^[15-16]。鉴于此,将层次分析法与信息熵法、模糊评价法相结合,在户式空调系统常用评价指标的基础上增加室外环境和系统技术特性相关评价指标,提出1种模糊综合评价法对其进行评价,以为不同地区户式空调系统的选择和优化提供科学的决策支持。

1 评价指标体系的建立

1.1 评价指标体系

使用层次分析法(AHP),依据相关户式空调

规范标准^[17-20],综合考虑用户需求及绿色低碳的环保要求,建立户式空调系统性能评价指标体系,如图1。

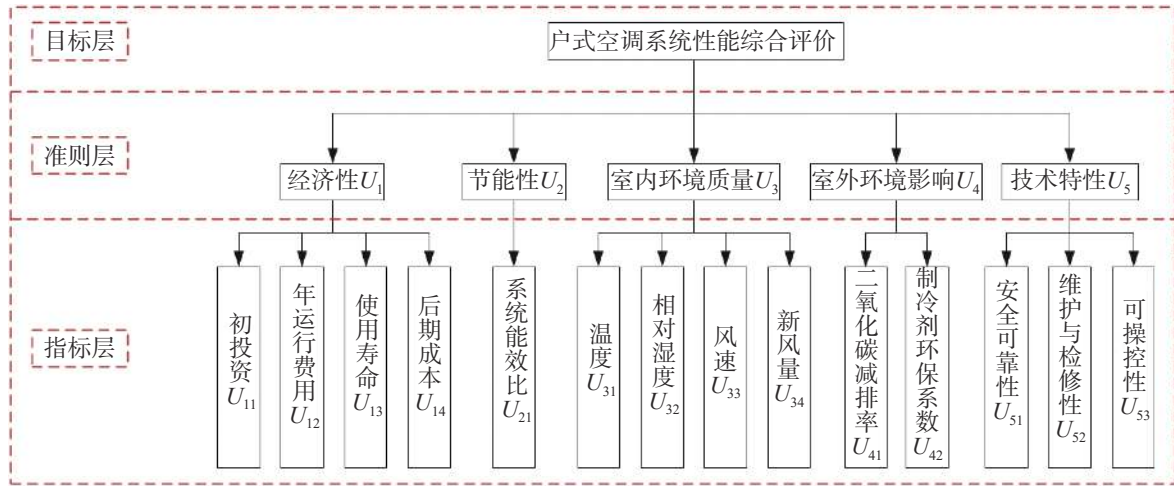


图1 户式空调系统性能评价指标体系

Fig. 1 Performance evaluation index system for residential air conditioning systems

户式空调系统性能评价指标体系由目标层、准则层、指标层构成。准则层包含经济性、节能性、室内环境、室外影响和技术特性5个指标。其中:室内环境质量指标用以评价舒适健康的需求变化,室外环境指标用以评价绿色低碳的需求变化,技术特性指标用以评价用户需求的变化,经济性、节能性指标用以评价高性价比的变化。以上5个指标体现了用户需求由冷暖转变为舒适、节能转变为低碳、价格转变为性价比等的层次变化,既响应国家节能减排和环境保护政策,又兼顾用户需求体验的变化。

参考全生命周期成本方法将指标层细化为14个

指标,经济性细化为初投资、年运行费用、使用寿命和后期成本;根据节能指标的优缺点将节能性细化为系统能效比;根据用户的健康舒适需求,将室内环境质量细化为温度、相对湿度、风速和新风量;根据绿色低碳需求,将室外环境需求细化为二氧化碳减排率、制冷剂环保系数;结合用户实际使用情况,将技术特性细化为安全可靠、维护与检修性和可操控性。

1.2 指标数据的获取

指标体系中的指标分为设计阶段及运行阶段2种情况,主要采用实际测试、仿真模拟、调查问卷、实际成本与预测等方法来获取相应数据,具体如表1。

表1 户式空调系统性能评价指标数据的获取方法

Tab. 1 Methods for obtaining performance evaluation index data of residential air conditioning systems

评价指标		获取方法	
准则层	指标层	设计阶段	运行阶段
经济性	初投资	暖通系统设计成本、设备采购成本及施工安装成本	系统运行成本及管理成本
	年运行费用		
	使用寿命		
	后期成本		
节能性	系统能效比	当量满负荷运行时间法	实际测试
	室内环境质量	Airpak仿真模拟	实际测试
温度			
相对湿度			
风速			
室外环境影响	新风量	设计方案的平均送风量	
	二氧化碳减排率	通过节能量和相应能源排放因子进行计算	
	制冷剂环保系数	制冷剂的全球变暖潜能(global warming potential, GWP), 臭氧消耗潜能(ozone depletion potential, ODP)和充注量	
技术特性	安全可靠	调查问卷	
	维护与检修性		
	可操控性		

根据暖通系统设计成本、设备采购成本、施工安装成本、实际运行成本和管理成本获取空调系统的经济性指标数据;采用当量满负荷运行时间法,根据预算和运行测试的系统当量满负荷运行时间计算系统能效比,表征节能性指标;根据 Airpak 仿真模拟获得的温度、相对湿度、风速,根据设计的平均送风量获得的新风量和运行测试的温度、相对湿度、风速、新风量获取室内环境质量指标数据;根据设计和运行测试的节能量和相应能源排放因子,制冷剂的全球变暖潜能 (global warming potential, GWP)、臭氧消耗潜能 (ozone depletion potential, ODP) 和充注量计算室外环境指标中的二氧化碳减排率和制冷环保系数;根据调查问卷结果表征技术特性指标的安全性、维护与检修性、可操控性。

2 模糊综合评价方法

2.1 评价因素集

建立评价因素集 $U=\{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{21}, U_{31}, U_{32}, U_{33}, U_{34}, U_{41}, U_{42}, U_{51}, U_{52}, U_{53}\}$, 设定评价因素集中每个指标的评判标准, 即评语集 $V=\{\text{优, 良, 中, 差}\}$, 各评语分别对应 $\{90, 70, 50, 30\}$ 。

2.2 指标权重

为保证系统定量与定性指标权重的合理性, 采用主观和客观相结合的赋权法。使用层次分析法将

复杂问题分解, 并结合专家调查法集中专家的经验知识进行初步的评判打分, 专家数量越多评判结果越准确。考虑到不同专家的意见有统一和分散的区别, 采用客观赋权中的熵值法评判不同专家意见在同一指标下的离散程度, 在不改变原权重前提下, 以熵值为修正值对原权重进行修正, 得到新的权重。具体步骤为: 采用层次分析法设计指标权重专家问卷; 根据专家问卷调查结果, 采用 1~9 标度法确定指标的重要程度, 通过两两相对重要性评定得到判断矩阵, 且对判断矩阵进行一致性检验; 根据判断矩阵计算得到各指标的权重。

采用信息熵法修正权重, 计算权重修正系数, 如式 (1); 对原权重进行修正, 如式 (2); 将准则层权重与指标层权重相乘得到综合权重, 结果见表 2。

$$X_j = - \sum_{i=1}^m w_{ij} \ln w_{ij} \tag{1}$$

$$W_j = \frac{X_j w_j}{\sum_{j=1}^n X_j w_j} \tag{2}$$

式中: i 为专家问卷数; j 为指标数; w_{ij} 为专家指标权重; X_j 为权重修正系数; w_j 为指标集结权重; W_j 为修正后权重。

表 2 户式空调系统性能评价指标修正后的综合权重

Tab. 2 Revised comprehensive weight of performance evaluation index for residential air conditioning systems

准则层	权重	指标层	权重	综合权重
经济性	0.192 7	初投资	0.328 2	0.063 2
		年运行费用	0.357 6	0.068 9
		使用寿命	0.276 6	0.053 3
		后期成本	0.037 5	0.007 2
节能性	0.144 2	系统能效比	1.000 0	0.144 2
室内环境质量	0.532 0	温度	0.439 6	0.233 9
		相对湿度	0.186 5	0.099 2
		风速	0.081 5	0.043 4
		新风量	0.292 5	0.155 6
室外环境影响	0.030 1	二氧化碳减排率	0.569 8	0.017 2
		制冷剂环保系数	0.430 2	0.012 9
技术特性	0.101 0	安全可靠	0.611 7	0.061 8
		维护与检修性	0.193 8	0.019 6
		可操控性	0.194 5	0.019 6

2.3 指标评分等级

为衡量户式空调系统性能评价各指标的表现情况,根据国家标准^[21-25]、行业规范^[20,26],参考文

献^[27-28]中评价指标体系的评分准则,确定不同定量指标的评分标准,制定相应指标评分等级,结果如表3。

表3 户式空调系统性能评价指标评分等级

Tab. 3 Score grade of performance evaluation index for residential air conditioning systems

评价指标	工况	优	良	中	差
初投资/(元/m ²)	—	300	500	800	1 000
年运行费用/(元/m ²)	—	40	60	80	100
使用寿命/年	—	30	20	10	5
后期成本/(元/m ²)	—	30	50	80	100
系统能效比	制冷	2.9	2.7	2.5	2.3
	制热	2.9	2.7	2.5	2.1
温度/℃	夏季	28	27	26	24
	冬季	18	20	22	24
相对湿度/%	夏季	70	60	50	40
	冬季	60	50	40	30
风速/(m/s)	夏季	0.4	0.35	0.3	0.25
	冬季	0.3	0.25	0.2	0.15
新风量/(m ³ /h)	—	50	40	30	10
二氧化碳减排率/%	—	100	80	60	40
制冷剂环保系数	普通型	25	50	75	100
	低温型	88	176	264	352
安全可靠	—	很好	好	一般	差
维护与检修性	—	很简单	简单	一般	复杂
可操控性	—	易控	简单可控	常规可控	不可控

2.4 指标隶属度

评价指标隶属于户式空调系统性能的优良程度为隶属度,文中基于模糊隶属度理论,采用分布函数法对户式空调系统性能评价系统中的定量指标进行隶属度计算,采用等级比重法对定性指标进行隶属度值计算。

2.4.1 定量指标

初投资 U_{11} 、年运行费用 U_{12} 、使用寿命 U_{13} 、后期成本 U_{14} 、系统能效比 U_{21} 、温度 U_{31} 、相对湿度 U_{32} 、风速 U_{33} 、新风量 U_{34} 、二氧化碳减排率 U_{41} 、制冷剂环保系数 U_{42} 为定量指标,基于三角形分布对定量指标进行隶属度计算,即根据表1计算指标实际值;结合表3分析指标实际值 x_i 的评分等级,选取合适

的模糊分布函数;将实际值 x_i 代入表4所示的相应等级隶属度函数 $r_{ij}(x)$ 得出该指标隶属度。

指标隶属度分布函数分为“偏小型”和“偏大型”。适用“偏小型”分布函数的指标包括 U_{11} 、 U_{12} 、 U_{14} 、 U_{31} 、 U_{32} 、 U_{33} 、 U_{42} ,其指标值越小越好;偏小型隶属度分布函数中 $x_1 < x_2 < x_3 < x_4$,用 n_1 级、 n_2 级、 n_3 级、 n_4 级分布表示优、良、中、差4个评分等级。指标 U_{13} 、 U_{21} 、 U_{34} 、 U_{41} 适用的分布函数为“偏大型”,其指标值越大越好,与“偏小型”隶属度中的 x 值相反,“偏大型”隶属度分布函数中 $x_4 < x_3 < x_2 < x_1$,用 n_1 级、 n_2 级、 n_3 级、 n_4 级分布表示优、良、中、差4个评分等级。

表4 不同等级隶属度分布函数

Tab. 4 Membership distribution function of different levels

等级	“偏小型”隶属度分布函数	“偏大型”隶属度分布函数
n_1 级 分布函数	$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \leq x_1 \\ \frac{x_2 - x_{ij}}{x_2 - x_1}, & x_1 < x_{ij} \leq x_2 \\ 0, & x_{ij} > x_2 \end{cases}$	$r_{ij} = \begin{cases} 1, & x_{ij} \geq x_1 \\ \frac{x_{ij} - x_2}{x_1 - x_2}, & x_1 > x_{ij} \geq x_2 \\ 0, & x_{ij} < x_2 \end{cases}$

续表

等级	“偏小型”隶属度分布函数	“偏大型”隶属度分布函数
n ₂ 级 分布函数	$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq x_1 \\ \frac{x_{ij} - x_1}{x_2 - x_1}, & x_1 < x_{ij} \leq x_2 \\ \frac{x_3 - x_{ij}}{x_3 - x_2}, & x_2 < x_{ij} \leq x_3 \\ 0, & x_{ij} > x_3 \end{cases}$	$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \geq x_1 \\ \frac{x_1 - x_{ij}}{x_1 - x_2}, & x_1 > x_{ij} \geq x_2 \\ \frac{x_{ij} - x_3}{x_2 - x_3}, & x_2 > x_{ij} \geq x_3 \\ 0, & x_{ij} < x_3 \end{cases}$
n ₃ 级 分布函数	$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq x_2 \\ \frac{x_{ij} - x_2}{x_3 - x_2}, & x_2 < x_{ij} \leq x_3 \\ \frac{x_4 - x_{ij}}{x_4 - x_3}, & x_3 < x_{ij} \leq x_4 \\ 0, & x_{ij} > x_4 \end{cases}$	$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \geq x_2 \\ \frac{x_2 - x_{ij}}{x_2 - x_3}, & x_2 > x_{ij} \geq x_3 \\ \frac{x_{ij} - x_4}{x_3 - x_4}, & x_3 > x_{ij} \geq x_4 \\ 0, & x_{ij} < x_4 \end{cases}$
n ₄ 级 分布函数	$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \leq x_3 \\ \frac{x_{ij} - x_3}{x_4 - x_3}, & x_3 < x_{ij} \leq x_4 \\ 1, & x_{ij} > x_4 \end{cases}$	$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij} \geq x_3 \\ \frac{x_3 - x_{ij}}{x_3 - x_4}, & x_3 > x_{ij} \geq x_4 \\ 1, & x_{ij} < x_4 \end{cases}$

2.4.2 定性指标

安全可靠 U₅₁、维护与检修性 U₅₂、可操控性 U₅₃ 为定性指标, 根据各指标的评价标准和实际情况确定其隶属度。通过对多位专家进行问卷调查, 确定各指标在优、良、中、差 4 个评语等级下的投票数, 计算不同评语等级下的频率即为该指标的隶属度。

2.5 综合评价流程

根据建立的户式空调系统性能评价指标体系, 确定综合评价流程, 如图 2。

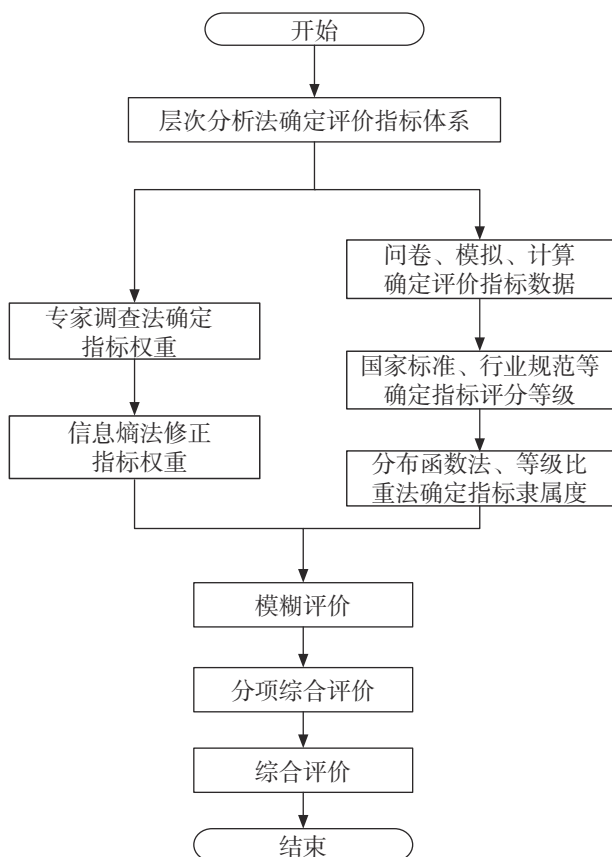


图2 户式空调系统综合评价流程图

Fig. 2 Flowchart of comprehensive evaluation for residential air conditioning systems

具体步骤包括以下 3 个阶段:

1) 根据表 1 对评价指标进行量化计算, 得出指标值。

2) 模糊评价分为指标权重计算、隶属度矩阵的确定和模糊评价等。利用层次分析法和信息熵法得到指标权重; 利用分布函数法和等级比重法得到隶属度矩阵; 将指标权重 W 和隶属度矩阵 R 进行模糊合成运算, 得到模糊评价向量 $B=W \cdot R=(b_1, b_2, b_3, b_4)$ 。

3) 综合评价包括指标分项综合评价 (式 (3)) 和综合评价 (式 (4)) 两部分。

$$Z_i = B_i V \tag{3}$$

$$Z_{\text{总}} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5 \tag{4}$$

当 $Z_{\text{总}} \in [70, 90]$, 系统综合评定等级为 I 级; 当 $Z_{\text{总}} \in [50, 70)$, 系统综合评定等级为 II 级; 当 $Z_{\text{总}} \in [30, 50)$, 系统综合评定等级为 III 级; 当 $Z_{\text{总}} \in [0, 30)$, 系统综合评定等级为 IV 级。

3 评价结果与分析

以经典的多联机和热湿分控空调 2 种户式空调系统为案例, 分别使用层次分析法和本文提出的模糊综合评价法评价其性能, 验证所提方法的可靠性与优越性。建筑总面积为 247.08 m², 建筑安装空调面积为 109.35 m², 2 种户式空调的设备选型方案见表 5, 6。依据表 1 户式空调系统性能评价指标的获取方法确定多联机和热湿分控空调系统性能评价指标值, 如表 7。

3.1 层次分析法评价结果

基于表 7 的多联机和热湿分控空调系统性能评价指标, 采用层次分析法对其进行评价。根据表 3 的指标等级确定多联机和热湿分控空调系统性能评价指标等级, 设计指标权重专家问卷, 根据专家问卷调查结果, 结合 1~9 标度法确定各指标权重, 如表 8。

通过线性加权的方法计算出2种方案的分项分数和总分,结果如图3。

表5 户式多联式中央空调系统主要设备

Tab. 5 Main equipment of residential multi-split central air conditioning systems

主要设备	型号	性能参数
家用中央空调主机	MDS120DR5	制冷/热量 33.6/37.8 kW; 制冷/热功率 8.84/9.95 kW; 制冷剂 R410A
暗装吊顶式室内机	MCC022VP	额定制冷/热量 2.2/2.5 kW; 输入功率 0.043 kW; 高档风量 430 m ³ /h
暗装吊顶式室内机	MCC032VP	额定制冷/热量 3.2/3.6 kW; 输入功率 0.057 kW; 高档风量 630 m ³ /h
暗装吊顶式室内机	MCC090VP	额定制冷/热量 9.0/10.0 kW; 输入功率 0.195 kW; 高档风量 1 400 m ³ /h

表6 户式热湿分控空调系统主要设备

Tab. 6 Main equipment of residential heat and humidity separate control air conditioning systems

主要设备	型号	性能参数
空气源热泵冷热水主机	MAC070ER5	制冷/热量 19.8/20.8 kW; 制冷/热功率 6.7/6.5 kW; 制冷剂 R410A
	MCW200BC	制冷量 2.68 kW; 中档风量 279 m ³ /h; 功率 0.039 kW
干式风机盘管	MCW300BC	制冷量 3.13 kW; 中档风量 418 m ³ /h; 功率 0.053 kW
	MCW1000BC	制冷量 8.57 kW; 中档风量 1 394 m ³ /h; 功率 0.183 kW
膨胀水箱	圆形	体积 0.06 m ³
循环水泵	QPGR40-100A	流量 5.6 m ³ /h; 扬程 10 m; 功率 0.37 kW
溶液调湿新风机	HDF-005	处理风量 500 m ³ /h; 制冷量 6.5 kW; 除湿量 8 kg/h; 装机功率 1.5 kW

表7 2种户式空调系统方案的指标值

Tab. 7 Index values for types of residential air conditioning systems

指标	多联机方案	热湿分控方案
初投资/(元/m ²)	730.69	870.77
年运行费用/(元/m ²)	96.33	98.75
使用寿命/a	20	15
后期成本/(元/m ²)	73.26	87.02
系统能效比	3.61	2.20
温度/°C	24.5	26.3
相对湿度/%	33.5	36.5
风速/(m/s)	0.19	0.32
新风量/(m ³ /(h·人))	0	41.7
二氧化碳减排率/%	72.40	54.70
制冷剂环保系数	70.98	46.14
安全可靠	很好	好
维护与检修	复杂	简单
可操控性	简单可控	常规可控

表8 户式空调系统性能评价指标综合权重

Tab. 8 Comprehensive weight of performance evaluation index for residential air conditioning systems

准则层	权重	指标层	权重	综合权重
经济性	0.193 7	初投资	0.319 1	0.061 8
		年运行费用	0.337 7	0.065 4
		使用寿命	0.275 7	0.053 4
		后期成本	0.067 5	0.013 1
节能性	0.156 2	系统能效比	1	0.156 2
		温度	0.404 7	0.189 7
室内环境质量	0.468 8	相对湿度	0.204 7	0.096 0
		风速	0.112 2	0.052 6
		新风量	0.278 4	0.130 5
室外环境影响	0.057 3	二氧化碳减排率	0.621 2	0.035 6
		制冷剂环保系数	0.378 8	0.021 8
技术特性	0.124 0	安全可靠	0.614 9	0.076 2
		维护与检修	0.193 9	0.024 0
		可操控性	0.191 2	0.023 7

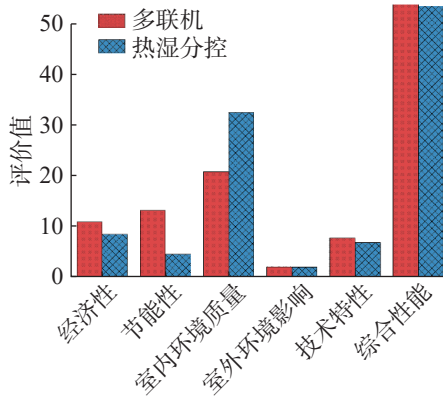


图3 基于层次分析法的综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive evaluation results based on the AHP

由图 3 可知: 从指标分项评分看, 经济性、节能性和技术特性指标多联机方案评价值 (10.73, 12.98, 7.52) 优于热湿分控方案; 从室内环境质量指标评分看, 多联机方案评价值低于热湿分控方案; 从室外环境影响指标评分看, 两方案的评价值一致; 综合评价结果看, 多联机方案和热湿分控方案的评价值几乎一致, 分别为 53.72, 53.43, 评价等级均处于 II 级, 2 种空调系统方案没有明显的优劣, 层次分析法难以为空调选型提供参考。

3.2 模糊综合评价法评价结果

依据建立的隶属度理论, 以多联机方案的经济性为例, 其初投资 U_{11} 满足偏小型三角形分布, 按照三角形隶属度函数中偏小型分布函数进行计算:

$$x_2 = 500 \leq x_{U_{11}} = 730.69 \leq x_3 = 800$$

分别求出各等级隶属度, 多联机方案的初投资指标隶属度为 (0, 0.23, 0.77, 0), 由此得到多联机方案的隶属度矩阵:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.23 & 0.77 & 0 \\ 0 & 0 & 0.18 & 0.82 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.22 & 0.78 & 0 \end{bmatrix}$$

对经济性指标进行分项综合评价, 多联机方案的经济性进行综合评价: $B_1 = W_1 R_1$ 。

$$B_1 = [0.063 \ 2 \ 0.068 \ 9 \ 0.053 \ 3 \ 0.007 \ 2] \begin{bmatrix} 0 & 0.23 & 0.77 & 0 \\ 0 & 0 & 0.18 & 0.82 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.22 & 0.78 & 0 \end{bmatrix} = [0 \ 0.069 \ 4 \ 0.066 \ 7 \ 0.056 \ 5]$$

多联机方案中经济性分项综合评价: $Z_1 = 0 \times 90 + 0.069 \ 4 \times 70 + 0.066 \ 7 \times 50 + 0.056 \ 5 \times 30 = 9.888$ 。其余评价指标分项综合评价计算同上, 具体结果见图 4。

由图 4 可知: 基于模糊综合评价的 2 种空调系统方案综合评定等级均为 II 级, 但多联机方案的综

合评价值大于热湿分控方案, 分别为 68.50, 59.09, 评价结果差异明显, 可为空调选型提供参考; 评价结果更细化, 从 2 种空调系统方案的分项评价指标看, 室外环境和技术特性指标值几乎一致, 经济性、节能性指标值多联机方案高, 室内环境质量指标值热湿分控方案稍高。综合表明多联机方案总体更优, 但是对于室内环境要求严格的地区热湿分控方案更适用。

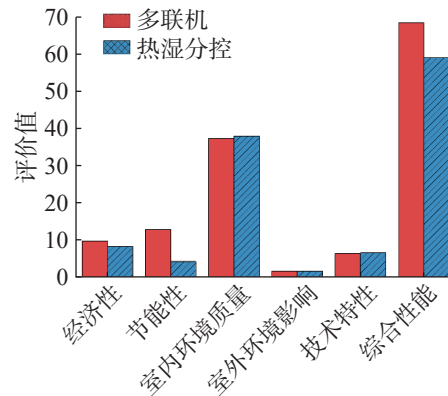


图4 基于模糊综合评价法的综合评价结果

Fig. 4 Comprehensive evaluation results based on the fuzzy comprehensive evaluation method

综上可看出: 本文提出的模糊综合评价法具有可靠性, 与层次分析法相比其评价结果更精细。这主要是因为模糊综合评价法的结果既包含层次分析法的条理性和稳定性, 又在模糊评价法和信息熵法的作用下完成复杂问题的量化, 致使得出的评价结果更具科学性和系统性。

4 结论

基于常用空调系统性能评价方法存在的不足, 提出 1 种模糊综合评价法, 以层次分析法为基础, 使用信息熵法修正指标权重, 结合模糊评价法对户式空调系统性能进行评价, 且以多联机与热湿分控 2 种典型的空调系统方案为例进行验证, 得到如下主要结论:

1) 模糊综合评价法与层次分析法对 2 种户式空调系统方案的综合评定等级均为 II 级, 表明模糊综合评价法可靠。对于 2 种空调方案的评价结果, 层次分析法的评价值几乎相等, 难以为空调选型提供参考; 模糊综合评价法的评价值分别为 68.50 和 59.09, 结果差异明显, 可为空调选型提供参考。

2) 模糊综合评价法的结果更精细, 其中多联机方案的经济性、节能性指标优于热湿分控方案; 而热湿分控方案的室内环境质量指标评价值高, 其更适用于室内环境要求严格、室外气候恶劣的地区。

3) 相对于层次分析法,模糊综合评价法的指标体系中增加了室外环境及技术特性两类指标,其评价指标更全面,且顺应了空调行业绿色低碳的发展要求;采用模糊评价法和信息熵法将指标体系中的复杂问题进行量化,可解决评价过程复杂和评价结果主观性强的问题。因此,本文提出的模糊综合评价法对设计阶段的户式空调选型及运行阶段的户式空调系统性能评价具有科学的指导作用。

参考文献:

- [1] 李夏莉,李树林,刘咸定.溴化锂吸收式制冷装置对环境影响因素的分析[J].制冷学报,1999(2):56-59.
- [2] 王长庆,龙惟定,丁文婷.直燃型溴化锂吸收式机组与风冷热泵机组的一次能耗比较[J].流体机械,2001(7):54-57.
- [3] 周立红,侯鑫鑫,王硕.基于层次分析法分析的C150超高性能混凝土综合性能评价[J].粉煤灰综合利用,2024,38(3):35-39.
- [4] 张梦瑶,郑谦.长三角城市群农业信息化发展水平测度[J].安徽科技学院学报,2022,36(3):97-102.
- [5] 朱方霞,陈华友.民生工程综合绩效的TOPSIS评价[J].统计与决策,2020(6):182-184.
- [6] 王豆豆,苟立,张彬.大型空调系统生命周期评价与能源利用评价模型[J].土木建筑与环境工程,2015(1):47-54.
- [7] 刘涛.户式中央空气调节节能措施分析[J].制冷与空调,2008(1):33-35.
- [8] ZHANG Z J, ZHANG Y F, KHAN A. Thermal comfort of people in a super high-rise building with central air-conditioning system in the hot-humid area of China[J]. Energy and Buildings, 2020, 209:109646
- [9] 吕浩. THIC 空调系统在绿色办公建筑中的适应性[D].北京:北京建筑大学,2019.
- [10] 陈慧,韩东太,刘磊.毛细管空调与传统空调的空气调节性能的对比试验[J].流体机械,2015,43(9):63-66,82.
- [11] 陈隽锋,张永东,黎强,等.某 THIC 空调系统热舒适性及能耗的模拟分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2020,45(2):79-84.
- [12] TAN X, ZHU Z J, SUN G X, et al. Room thermal load prediction based on analytic hierarchy process and back-propagation neural networks[J]. Building Simulation, 2022, 15(11):1989-2002.
- [13] 史红人,程志刚,范智高,等.基于熵值法的成渝城市群城市化水平综合评测[J].成都信息工程大学学报,2024,39(3):343-352.
- [14] YUAN W, LIU Z G. Study on evaluation method of energy-saving potential of green buildings based on entropy weight method[J]. International Journal of Global Energy Issues, 2023, 45(4/5):448-460.
- [15] XU R J, LIU X, CUI D G, et al. An evaluation method of contribution rate based on fuzzy Baye-sian networks for equipment system-of-systems architecture[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2023, 34(3):574-587.
- [16] 马进功,宋德军.基于变权模糊理论的掘锚一体机掘进适用性数学评价[J].煤炭学报,2023,48(6):2579-2589.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局.空气调节系统经济运行标准:GB/T 17981—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局.多联式空调(热泵)机组能效限定值及能源效率等级:GB 21454—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [19] 国家质量监督检验检疫总局.室内空气质量标准:GB/T 18883—2002[S].北京:中国质检出版社,2003.
- [20] 上海市质量技术监督局.家用中央空调工程技术规程:DB31/T 322—2004[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [21] 国家环境保护总局.室内空气质量:GB/T 18883—2002[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [22] 国家标准化管理委员会.空气调节系统经济运行:GB/T 17981—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [23] 国家标准化管理委员会.制冷剂编号方法和安全性分类:GB/T 7778—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [24] 住房和城乡建设部.公共建筑节能设计标准:GB 50189—2015[S].北京:建筑工业出版社,2015.
- [25] 住房和城乡建设部.民用建筑供暖通风与空气调节设计规范:GB 50736—2016[S].北京:建筑工业出版社,2012.
- [26] 中国工程建设标准化协会.空气源热泵供暖工程技术规程:T/CECS 564—2018[S].北京:建筑工业出版社,2018.
- [27] 毛松平.基于武汉地区居住建筑的节能评价研究[D].武汉:武汉轻工大学,2015.
- [28] 曹也.空气源热泵热水系统综合评价指标体系研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.

责任编辑:闫芳芳