文章编号:1674-2869(2024)03-0337-06

基于层次分析法-模糊综合评价法的住宅舒适度评价体系研究

程志坚,朱志刚*,吴枫琪,蔡泽藩,孙椿兴
武汉工程大学土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430074

摘 要:住宅舒适度受多种因素影响,然而目前的相关研究大多侧重于单个因素。本文通过查阅大量的文献并向专家咨询确定了17项住宅舒适度评价指标,基于层次分析法确定评价指标的权重后运用模糊综合评价法对住宅舒适度进行整体评价。通过单因素轮换法对影响住宅舒适度的关键指标进行权重敏感性分析,得到敏感性强的指标是光照时间,其次是公共交通站点距离、通风及光照强度,敏感性相对较弱的是公共交通网线密度。验证了运用层次分析法确定的各指标权重在住宅舒适度评价中是合理可靠的,最后形成一套可行的住宅舒适度评价体系,为后续的研究与应用打下坚实基础。

关键词:舒适度;评价体系;层次分析法;模糊综合评价法;敏感性分析
中图分类号:TU241 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202211022

Evaluation system of comfort in housing based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation method

CHENG Zhijian, ZHU Zhigang, WU Fengqi, CAI Zefan, SUN Chunxing*
School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: Comfort in housing is affected by many factors. However, most of the current researches focus on a single factor. In this article, we determined 17 indices for comfort degree in housing evaluation by reviewing a large number of literature and consulting with experts. Then the weights of evaluation indices were determined based on analytic hierarchy process, and the fuzzy comprehensive evaluation method was used to evaluate the overall comfort level of residential environment. And through the single factor rotation method, the sensitivity analysis of the key indices affecting the comfort of the house was carried out. The index with the strongest sensitivity is illumination time, followed by the distance from public transport stations, ventilation and illumination intensity. The index with relatively weak sensitivity is public transport route density. It was verified that the weights determined by hierarchical analysis method are reasonable and reliable in the evaluation of residential environment comfort, and finally a feasible evaluation system of residential environment comfort was constructed, which lays a solid foundation for subsequent research and application.

Keywords: comfort degree; evaluation system; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation method; sensitivity analysis

随着社会经济的快速发展及物质生活水平的提升,人们对住宅的需求已不仅仅停留在居住层面上,而是逐渐转向舒适性,建造符合舒适标准的住宅已成为新的行业发展趋势[1-2]。影响住宅舒

收稿日期:2022-12-08
基金项目:武汉工程大学第十三届研究生教育创新基金(CX2021127)
作者简介:程志坚,硕士研究生。Email:1262794868@qq.com
***通信作者**:朱志刚,硕士,副教授。Email:406142669@qq.com
引文格式:程志坚,朱志刚,吴枫琪,等. 基于层次分析法-模糊综合评价法的住宅舒适度评价体系研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(3):337-342,348.

适度的因素涉及面广，既繁杂又多元。近年来，国内外学者对住宅舒适度开展了大量的研究，主要涉及光环境舒适度、热环境舒适度、声环境舒适度以及振动环境舒适度等方面。王小荣等[3]对老年人住宅厨卫的光环境及照度值进行了调研与实测研究；任宪玉[4]等对普通住宅的光环境适老化改造设计进行了研究；李聃等[5]对调谐质量阻尼器减振频率进行了充分的分析；连军等[6]对地铁引起钢结构住宅楼盖振动舒适度进行了分析；张刚等[7]分析了地下旋转设备对周边建筑的振动舒适度的影响并对减振进行了研究；付洁等[8]对军休所冬季室内的热环境相关优化进行了研究；侯昱晟等[9]对寒冷地区大窗墙比住宅热舒适性数值模拟进行了分析；张杰等[10]对蒙东地区牧民节能住宅夏季室内热环境进行了研究；陆珏等[11]针对既有住宅建筑及其声环境的特点对降噪隔声改造设计及相关应用进行了研究；刘静等[12]对简装样板间的普通水泥砂浆楼板和隔声保温砂浆楼板进行了撞击声隔声的对比检测。上述有关研究都侧重于影响住宅舒适度的单一因素，并未全面综合考虑多因素的共同影响，无法形成完整的评价体系。因此，确定关键指标、建立科学合理的体系进行充分且完整的评价对于住宅舒适度的全面评估和提升具有重要意义。本文首先通过查阅相关文献并向专家咨询得到若干个评价指标，再应用层次分析法确定评价指标的权重后通过单因素轮换（one-at-a-time，OAT）法选取部分关键的指标进行敏感性分析，最后确定舒适度等级并做出合理评价。

1 住宅舒适度评价指标的确定

首先通过查阅参考文献选取相关的指标，再经现场调查并从现场实际情况分析初步确定23项指标，分别是：光照强度、光色、炫光、光照时间、噪声类别、噪声产生时间、噪声大小、噪声时长、隔声效果、太阳辐射、通风、气候、建筑布局、湿度、温度、振动时长、振动频率、振动幅度、振动源、公共交通站点距离、公共交通日服务时间、公共交通线网密度、可选择公共交通种类。通过向专家咨询及信息反馈的方式对上述23项指标进行筛选，最终得到17项二级评价指标并归类为5个一级指标，即光环境、热环境、声环境、振动环境及交通环境。光环境包括光照强度、炫光、光照时间等3项指标，声环境包括噪声类别、噪声时长、噪声大小、隔声效果等4项指标，热环境包括太阳辐射、通风、气候、建筑布局、湿度等5项指标，振动环境包括振动时长、振动频率、振动幅度等3项指标，交通环境包括公共交通站点距离、公共交通线网密度等2项指标。

住宅舒适度按照由低到高划分为4个等级：不舒适、一般、舒适、非常舒适[13]，对应的分值区如表1所示。

表1 住宅舒适度等级

Tab. 1 Comfort in housing level

等级	住宅舒适度	对应得分
等级1	非常舒适	(8,10]
等级2	舒适	(6,8]
等级3	一般	(5,6]
等级4	不舒适	(0,5]

根据住宅用户的信息反馈、国家标准及行业相关规范等制定打分评判依据，采用由好到差分别为10分、6分、4分共3个分值评分标准，为住宅舒适度指标确定综合评分，如表2所示。

2 住宅舒适度评价指标权重的确定

确定权重是多属性综合评价最重要的问题之一，通常可以用以下2种方法来确定指标权重：①选用特定的模型计算权重系数的客观赋权法，该方法能够排除主观信息的干扰，保证数据的客观公正性；②邀请专家或专业相关人员打分的主观赋权法，该方法对存在矛盾的意见进行讨论，体现出“柔性”决策思想[14]。

2.1 建立层次结构模型

本文构建的层次结构模型如图1所示。

2.2 确定评价指标权重及一致性检验

根据1-9标度法对各指标的相对重要程度进行打分，如表3所示。

构造出$\boldsymbol{M}_A$、$\boldsymbol{M}_{B_1}$、$\boldsymbol{M}_{B_2}$、$\boldsymbol{M}_{B_3}$、$\boldsymbol{M}_{B_4}$和$\boldsymbol{M}_{B_5}$共6个判断矩阵，对6个矩阵进行计算分析得到的一致性比率（consistent ratio，CR）值均小于0.1，满足一致性检验[15]。

$$\boldsymbol{M}_A=\begin{bmatrix}1 & 5 & 3 & 4 & 2\\ 1/5 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/4\\ 1/3 & 3 & 1 & 2 & 1/2\\ 1/4 & 2 & 1/2 & 1 & 1/3\\ 1/2 & 4 & 2 & 3 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{B_1}=\begin{bmatrix}1 & 5 & 1/2\\ 1/5 & 1 & 1/7\\ 2 & 7 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{B_2}=\begin{bmatrix}1 & 1/3 & 1/7 & 1/5\\ 3 & 1 & 1/4 & 1/3\\ 7 & 4 & 1 & 3\\ 5 & 3 & 1/3 & 1\end{bmatrix}$$

表2　舒适度指标及评分依据

Tab. 2　Comfort indices and scoring parameters

序号	指标	参考文献	评判依据	得分/分
C_1	光照强度	[3，20]	阳光普照，照明光线温和，层次明显，舒适度较高	10
			阳光一般，照明亮度适中，照明层次一般，舒适度一般	6
			阳光存在遮挡，照明亮度昏暗，照明层次不清晰，舒适度低	4
C_2	炫光	[20]	无眩光，视觉良好	10
			存在略微炫光，视觉一般	6
			存在炫光，视觉较差	4
C_3	光照时间	[3，20]	光照时间≥7 h/d	10
			3 h/d≤光照时间<7 h/d	6
			光照时间<3 h/d	4
C_4	噪声类别	[11，21]	仅存在有楼板受热引起的噪声	10
			同时存在楼板因受热、交通等因素产生的噪声	6
			同时存在楼板因受热、汽车等交通及因人群聚集交谈而引起的噪声	4
C_5	噪声时长	[11，21]	噪声时长≤1 h/d	10
			1 h/d<噪声时长≤5 h/d	6
			噪声时长>5 h/d	4
C_6	噪声大小	[22]	噪声≤30 dB	10
			30 dB<噪声≤60 dB	6
			60 dB<噪声	4
C_7	隔声效果	[11，21−22]	门窗紧闭时，可听见低微噪声	10
			门窗紧闭时，可听见部分噪声	6
			门窗紧闭时，可听见大量噪声	4
C_8	太阳辐射	[1，8]	存在低微太阳辐射，舒适度高	10
			存在可接受范围太阳辐射，舒适度一般	6
			存在较高太阳辐射，舒适度差	4
C_9	通风	[8−9]	通风良好，有避风设施，全年舒适度高	10
			通风一般，避风设施一般，全年舒适度一般	6
			无风，无避风设施，全年舒适度差	4
C_{10}	气候	[23]	阴雨分布均匀，气候良好，舒适度高	10
			阴雨天分布不均匀，气候一般，舒适度一般	6
			全年晴天少或者降雨量少，气候较差，舒适度差	4
C_{11}	建筑布局	[2]	具有充足的活动空间，能够满足使用者多样化需求	10
			具有活动空间，但空间不足，不能满足完全使用者多样化需求	6
			缺乏多样化的活动空间，基本不能满足使用者的需求	4
C_{12}	湿度	[8−9]	湿度适宜	10
			湿度一般	6
			湿度较差，偏干旱或者潮湿	4
C_{13}	振动时长	[5]	振动时长≤1 h	10
			1 h<振动时长≤3 h	6
			3 h<振动时长	4
C_{14}	振动频率	[6]	振动频率≤50 Hz	10
			50 Hz<振动频率≤80 Hz	6
			80 Hz<振动频率	4
C_{15}	振动幅度	[5−6]	振幅较小，感觉不到振动，舒适度高	10
			振幅一般，感到轻微振动，舒适度一般	6
			振幅较大，偶尔能感受到间断振动，舒适度差	4
C_{16}	公共交通站点距离	[24]	公共交通站点距离≤500 m，舒适度高	10
			500 m<公共交通站点距离≤1 500 m，舒适度一般	6
			公共交通站点距离>1 500 m，舒适度较差	4
C_{17}	公共交通网线密度	[24]	公共交通路线数量≥5条，舒适度高	10
			5条>公共交通路线数量≥3条，舒适度一般	6
			3条>公共交通路线数量，舒适度差	4

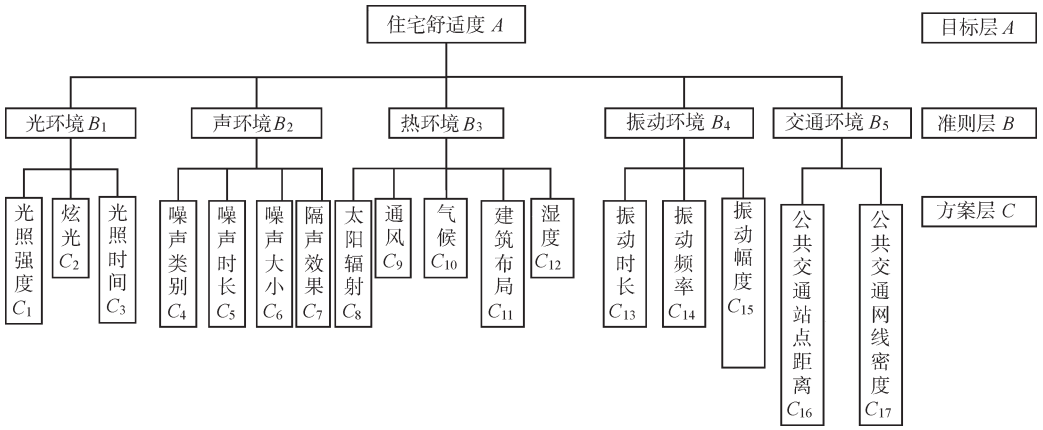

图1 住宅舒适度层次结构模型

Fig. 1 Hierarchical structure model of comfort in housing

表3 1−9标度法

Tab. 3 1−9 scale method

标度	说明
1	两指标在重要性上相当
3	两指标相比,前者稍重要于后者
5	两指标相比,前者明显比后者重要
7	两指标相比,前者强烈重要
9	两指标相比,前者极度重要
2、4、6、8	两指标的重要性趋于相邻标度之间
倒数	后者比前者的重要性

$$\boldsymbol{M}_{B_3}=\begin{bmatrix}1 & 1/5 & 1/3 & 3 & 2\\ 15 & 1 & 3 & 7 & 5\\ 3 & 1/3 & 1 & 5 & 5\\ 1/3 & 1/7 & 1/5 & 1 & 1/3\\ 1/2 & 1/5 & 1/5 & 3 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{B_4}=\begin{bmatrix}1 & 1/3 & 1/5\\ 3 & 1 & 1/3\\ 5 & 3 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{M}_{B_5}=\begin{bmatrix}1 & 3\\ 1/3 & 1\end{bmatrix}$$

5项一级指标的权重 w=(0.42, 0.06, 0.16, 0.10, 0.26),光环境下的二级指标权重 w_1=(0.33, 0.08, 0.59),声环境下的二级指标权重 w_2=(0.06, 0.13, 0.54, 0.27),热环境下的二级指标权重 w_3=(0.12, 0.49, 0.27, 0.04, 0.08),振动环境下的二级指标权重 w_4=(0.10, 0.26, 0.64),交通环境下的二级指标权重 w_5=(0.75, 0.25),各指标权重具体数值如表4所示。

表4 住宅舒适度指标权重

Tab. 4 Weights of comfort in indices of housing

一级指标	权重	二级指标	权重	总权重
光环境 B_1	0.42	光照强度 C_1	0.33	0.138 6
		炫光 C_2	0.08	0.033 6
		光照时间 C_3	0.59	0.247 8
声环境 B_2	0.06	噪声类别 C_4	0.06	0.003 6
		噪声时长 C_5	0.13	0.007 8
		噪声大小 C_6	0.54	0.032 4
		隔声效果 C_7	0.27	0.016 2
热环境 B_3	0.16	太阳辐射 C_8	0.12	0.019 2
		通风 C_9	0.49	0.078 4
		气候 C_{10}	0.27	0.043 2
		建筑布局 C_{11}	0.04	0.006 4
		湿度 C_{12}	0.08	0.012 8
振动环境 B_4	0.10	振动时长 C_{13}	0.10	0.010 0
		振动频率 C_{14}	0.26	0.026 0
		振动幅度 C_{15}	0.64	0.064 0
交通环境 B_5	0.26	公共交通站点距离 C_{16}	0.75	0.195 0
		公共交通网线密度 C_{17}	0.25	0.065 0

3 住宅舒适度指标权重敏感性分析

在住宅舒适度的评价中,通过专家的经验来确定各指标的权重是一种有效的方式,但同时也存在着很大的主观不确定性。因此需要对关键影响指标进行敏感性分析排除主观因素的影响,在多因素研究的过程中敏感性分析必不可少,能更直接影响研究结果的准确可靠性[16-18]。

3.1 权重敏感性分析框架

本文采用OAT法对关键指标的权重进行敏感性分析,逐个调整特定指标的权重值,同时保持其他指标权重的相对比例不变,用以反映特定指标的权重发生变化时相应住宅舒适度的变化规律和趋势,进而评价各指标的不确定性对研究结果的影响。

在敏感性分析中，需要确定适当的变化范围和步长，以保持所有权重的固定及可行性。OAT法的步骤整体分为3步：

（1）分别定义百分比变化范围（range of percent change，RPC）以及百分比变化步长（increment of percent change，IPC）[19]。RPC表示原始指标权重变化范围的百分比有限集，而IPC表示在固定范围内，指标权重每次变化的百分比幅度。

（2）计算各指标的权重值。保持所有因子权重的总和W始终为1：

$$W(\delta) = \sum_{i=1}^{n} W(C_i, \delta) = 1,$$
$$R_{\mathrm{RPC,min}} \leqslant \delta \leqslant R_{\mathrm{RPC,max}} \quad (1)$$

式（1）中：δ表示指标权重的百分比变化量，而$W(C_i, \delta)$表示第i个指标C_i在特定δ值下的权重；n是指标的总数，$R_{\mathrm{RPC,min}}$和$R_{\mathrm{RPC,max}}$分别表示RPC的最小值和最大值。

当一个主变化指标C_m的权重改变时，它的权重值在固定δ取值时可用式（2）表示：

$$W(C_m, \delta) = W(C_m, 0) + W(C_m, 0)\delta, 1 \leqslant m \leqslant n \quad (2)$$

式（2）中：$W(C_m, \delta)$表示主变化指标C_m在权重改变后的新权重；$W(C_m, 0)$表示主变化指标C_m在权重改变前的权重值。为了保证全部指标的权重值的和为1，其他指标的权重值需要根据式（3）重新计算：

$$W(C_i, \delta) = \frac{\left(1 - W(C_m, \delta)\right) W(C_i, 0)}{1 - W(C_m, 0)}, i \neq m, 1 \leqslant i \quad (3)$$

式（3）中：$W(C_i, 0)$是指标C_i的初始权重值。当主变化指标的权重改变时，会导致相应的评价结果发生变化。

（3）计算每次权重改变后的综合评价结果。

$$R(C_m, \delta) = W(C_m, \delta) \times A_m + \sum_{i=1}^{n} W(C_j, \delta) \times A_j \quad (4)$$

式（4）中：$R(C_m, \delta)$是因C_m权重的改变而产生的住宅舒适度新的综合评价结果；A_m表示主变化指标的得分值；$W(C_j, \delta)$表示其他指标调整后的权重；A_j表示其他指标对应的得分值。

3.2　权重敏感性分析

令RPC取值为±30%，IPC取值为±2%，选取5个关键指标对其进行权重敏感性分析，将改变后的各指标的权重与专家对各指标打分的分值相乘得到这5个指标的敏感性。

邀请1位专家对武汉市汉江湾壹号小区住宅舒适度影响指标打分，结果如表5所示。

表5　专家打分表

Tab. 5　Expert scoring

评价指标	分值	评价指标	分值
C_1	6.7	C_{10}	6.5
C_2	9.5	C_{11}	7.9
C_3	5.9	C_{12}	4.1
C_4	7.7	C_{13}	7.1
C_5	8.9	C_{14}	8.7
C_6	3.1	C_{15}	7.6
C_7	6.0	C_{16}	5.9
C_8	5.5	C_{17}	6.3
C_9	8.4		

敏感性分析结果见图2。各项指标的变动引起的舒适度评分的变动是以0%为中心单调变化的，斜率越大的指标对住宅舒适度的敏感性就越强。光照时间的权重最大，敏感性也最强，其余指标的敏感性也基本与其自身权重大小相对应。公共交通站点距离敏感性明显高于公共交通网线密度，因此公共交通站点距离比公共交通网线密度重要。通过对指标权重进行敏感性分析可以看出运用层次分析法确定的权重，合理有效并且能客观地反映住宅舒适性，充分验证了住宅舒适度评价的合理可靠性。

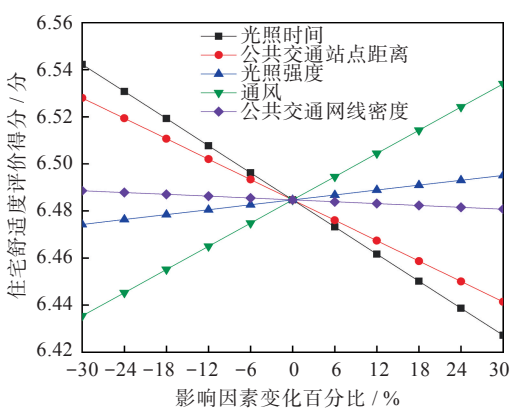

图2　住宅舒适度评价体系关键指标权重敏感性分析

Fig. 2　Sensitivity analysis results of key indicators of comfort evaluation system in housing

4　模糊综合评价

陆续邀请50人到武汉市汉江湾壹号小区对住宅进行现场调查，得到的住宅舒适度评价结果如表6所示。

表6 住宅舒适度问卷调查结果

Tab. 6 Questionnaire survey results of comfort in housing

评价指标	评价等级的比例			
	非常舒适	舒适	一般	不舒适
C_1	0.38	0.24	0.28	0.10
C_2	0.15	0.26	0.34	0.25
C_3	0.19	0.31	0.36	0.14
C_4	0.30	0.34	0.23	0.13
C_5	0.37	0.28	0.15	0.20
C_6	0.38	0.26	0.18	0.18
C_7	0.29	0.18	0.33	0.20
C_8	0.20	0.24	0.37	0.19
C_9	0.49	0.16	0.20	0.15
C_{10}	0.36	0.24	0.15	0.25
C_{11}	0.30	0.28	0.30	0.12
C_{12}	0.20	0.24	0.37	0.19
C_{13}	0.44	0.28	0.18	0.10
C_{14}	0.38	0.18	0.32	0.12
C_{15}	0.27	0.21	0.34	0.18
C_{16}	0.26	0.38	0.15	0.21
C_{17}	0.21	0.34	0.26	0.19

将以上调查结果与相应的权重相乘可得到单因素模糊评价向量为：

$\boldsymbol{p}_1=(0.250,0.283,0.332,0.136)$

$\boldsymbol{p}_2=(0.350,0.246,0.220,0.185)$

$\boldsymbol{p}_3=(0.389,0.202,0.225,0.184)$

$\boldsymbol{p}_4=(0.316,0.209,0.319,0.156)$

$\boldsymbol{p}_5=(0.248,0.370,0.178,0.205)$

将相应的权重与上述单因素的模糊综合评价向量相乘，得到多因素的模糊综合评价矩阵$\boldsymbol{P}$：

$$\boldsymbol{P}=w(\boldsymbol{p}_1\ \boldsymbol{p}_2\ \boldsymbol{p}_3\ \boldsymbol{p}_4\ \boldsymbol{p}_5)^{\mathrm{T}}=(0.284\ 0.283\ 0.267\ 0.166)$$

根据最大隶属度法则评估可得武汉市汉江湾壹号小区住宅舒适度等级为非常舒适。

5 结论与建议

本文基于层次分析法确定影响住宅舒适度的17项指标权重，采用模糊综合评价法进行评价，并通过OAT法对指标权重敏感性进行分析来验证结果的准确性，主要结论与建议如下：

(1)经过对住宅舒适度关键指标权重敏感性的分析，得到敏感性强的指标是光照时间，其次是公共交通站点距离、通风及光照强度，敏感性相对较弱的是公共交通网线密度。本文初始确定的权重是合理可靠的，能够真实反映住宅舒适度的状况。

(2)通过分析各指标权重可知，在未来住宅建设过程中应当着重考虑光照时间、光照强度、通风、交通等因素，充分考虑上述因素的影响并优化其积极作用能够大幅度提升住宅舒适性。

(3)目前对住宅舒适度评价体系的研究较少，结合实证分析可知本文确定的评价体系是科学可行的。未来相关研究中可探索信息化和大数据技术在舒适度评价体系中的应用，可以将建立的评价体系利用区块链技术加密固定，将不同类型的住宅的评价结果汇总后建立数据库，借助大数据平台方便使用者获取相关信息。

参考文献

[1] 金振山，杜晓宇. 高层高密度住区标准层形式及住户热舒适度相关评价研究——以重庆市为例[J]. 住区，2021(3)：113-118.

[2] 吴哲. 基于遥感数据的城市住宅小区室外舒适度研究[J]. 地理空间信息，2018，16(9)：75-78.

[3] 王小荣，赵子涵，贾巍杨，等. 老年人住宅厨卫光环境调研及照度值实测研究[J]. 照明工程学报，2021，32(6)：5-11.

[4] 任宪玉，吴云涛. 普通住宅的光环境适老化改造设计研究[J]. 美术大观，2020(7)：123-125.

[5] 李聃，曹铁柱，邓涛. 大跨结构的振动舒适度与TMD减振频域分析[J]. 建筑结构，2022，52(5)：75-80，69.

[6] 连军，曹吴臻，朱伟华. 地铁引起钢结构住宅楼盖振动舒适度分析[J]. 建筑结构，2022，52(增刊2)：894-897.

[7] 张刚，尹文汉，肖蕾，等. 地下旋转设备对周边建筑的振动舒适度影响与减振分析[J]. 建筑结构，2022，52(增刊2)：833-839.

[8] 付洁，王岩，曹立辉. 基于舒适性目标下军休所冬季室内热环境优化研究[J]. 天津城建大学学报，2020，26(6)：426-432.

[9] 侯昱晟，刘维，刘澦. 寒冷地区大窗墙比住宅热舒适性数值模拟分析[J]. 工程建设与设计，2021(17)：15-17，26.

[10] 张杰，张亚东，王伟栋. 蒙东地区农牧民节能住宅夏季室内热环境及遮阳研究[J]. 建筑科学，2020，36(10)：98-104，113.

[11] 陆珏，陈洋，谢蕞. 高架复合道路周边既有住宅建筑降噪隔声改造设计及应用研究[J]. 声学技术，2019，38(3)：328-333.

[12] 刘静，黄波. 绿色建筑建筑构件隔声现场检测方法研究[J]. 绿色建筑，2023，15(2)：61-63，75.

[13] 付亚超. 基于AHP-熵权法的城轨车辆基地智能运维评价体系研究[J]. 铁道标准设计，2022，66(8)：181-186.

(下转第348页)