

室内环境舒适度综合评价理论研究及测评系统设计^①

崔法毅^② 信思旭

(燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室 秦皇岛 066004)

摘 要 从分析室内环境的具体含义出发,建立了室内环境与室内舒适度之间的桥梁。从人因工程学和心理学的角度,归纳分析了涉及室内环境的人-机-环境系统所包含的重要因素的来源、危害以及对室内人员的直接影响,进而将改进的韦伯-费希纳定律评价模型、层次分析模型和属性识别模型相结合,从室内环境的分级标准、室内环境舒适度各级评价指标的权重以及综合评价机制三个方面,构建了一套较为完善的室内环境舒适度综合评价理论。在此基础上,利用 STM8S207 单片机、稳压电源、液晶显示屏、气体传感器等硬件及相关软件,设计了一套能够实时检测、评价、显示、报警、存储室内环境各要素指标的舒适度测评系统,该系统在实测中取得了预期效果。

关键词 室内环境舒适度,属性识别模型,层次分析模型,改进的韦伯-费希纳定律评价模型,STM8S207 单片机,传感器

0 引言

对现代人活动行为的调查表明,绝大多数人一生中有 2/3 以上的时间在各种各样的室内中度过,多数人一天中 60%~80% 的时间在室内度过,城市人群在室内度过的时间超过 90%,因而保持良好的室内环境的重要性不言而喻,室内环境状况直接关系到人们的健康。随着社会的进步,人们对居住环境的要求逐渐从“功能型”向“舒适型、健康型”转变,要求建筑物能够提供一个温馨、舒适、经济的室内生活和工作环境^[1,2]。所以,对室内环境进行舒适度的测评就显得尤为重要。目前国内外对室内环境舒适度测评理论的研究主要有两个方向:对热环境舒适性分析和对室内环境质量评价,但始终没有将两者进行有效的融合,致使对室内环境的评价存在失效、失误等现象^[3,4]。本文针对室内环境多元化、复杂化的特点,将热环境中的舒适性与空气环境中的安全性相融合,基于改进的韦伯-费希纳定律评价模型、层次分析模型和属性识别模型,构建了一套较为完善的室内环境舒适度综合评价理论,在此基础上,设计了一套能够实时检测、评价、显示、报警、

存储室内环境重要指标的舒适度测评系统,在实测中达到了预期效果。

1 室内环境及舒适度

室内环境涉及室内的人-机-环境系统,其中,人指室内成员,机指室内的一切装置,环境指室内环境的各要素。从人因工程学的角度分析,室内环境的各要素包括微气候、空气质量、噪声与振动环境和其它因素。

舒适度是指人们对客观环境从心理与生理方面所感受到的满意程度而进行的综合评价,通常意义上的舒适度指数是描述温度和湿度对人体的综合影响的指标,表征人体在某种温、湿度条件下对该空气环境感觉舒适的程度,用温度和相对湿度的不同组合来表示。

室内环境舒适度是指人们对室内这个客观环境从心理与生理上所感受到的满意程度。然而,在温度、湿度、空气流速等恒定的条件下,如果室内成员在生理上出现眩晕、压抑、困乏、焦躁、精神不集中等症状,极易导致其心理随之发生相应的变化,造成舒适度的骤降,而这些症状的产生主要来源于空气质

① 秦皇岛市科学技术研究与发展计划(2012021A004)资助项目。

② 男,1982 年生,博士,讲师;研究方向:计算机视觉,模式识别,无线传感器网络,嵌入式系统设计;联系人,E-mail: fayi2001@sina.com (收稿日期:2014-03-07)

量、噪声振动等室内环境的恶化^[5]。所以,常用的舒适度指数已经无法满足现代舒适度的评价,需要将热环境中的舒适性与空气环境中的安全性相融合,构建一套较为完善的室内环境舒适度综合评价理论。

2 室内环境舒适度综合评价理论

2.1 综合评价理论的核心思想

综合评价理论的核心思想是以《室内空气质量标准》、《环境空气质量标准》为基础,结合改进的韦伯-费希纳定律评价模型确定室内环境的分级标准;以领域专家的调查问卷为基础构造判断矩阵,结合层次分析模型确定各级评价指标的权重;以属性识别模型为主线,从人因工程学的角度出发,结合检测到的各要素含量,通过计算二级属性测度矩阵、一级属性测度矩阵,得出室内环境舒适度的综合评价结果。

室内环境舒适度的总体评价流程如图 1 所示。系统监测到室内环境各要素的实时数据,根据室内环境各要素的分级标准,得到各要素测量值的属性测度;结合不同层次下室内环境舒适度二级评价指标的权重,对评价对象空间室内环境各子集的要素进行属性测度计算,得到二级属性测度矩阵;然后,根据室内环境舒适度一级评价指标的权重,对评价对象空间室内环境的各子集进行属性测度计算,得

到一级属性测度矩阵;最后,按照置信度准则和评价分数准则,判断室内环境的舒适程度隶属于哪一级别。

2.2 室内环境分级标准的确定

2.2.1 韦伯-费希纳认知评价模型

德国生理学家韦伯(Weber)提出,在同类刺激之下,差别阈限的大小是随着标准刺激强弱而成一定比例关系,即

$$k = \Delta I / I \quad (1)$$

式中 k 为韦伯率, ΔI 为差别阈限, I 为原刺激量。

德国物理学家费希纳(Fechner)结合韦伯定律经研究得出韦伯-费希纳定律:感觉的大小同刺激强度的对数成正比,刺激强度按几何级数递增,而感觉强度按算术级数递增^[6],即

$$S = K \lg R \quad (2)$$

式中 S 为感觉, R 为刺激强度, K 为常数。

此后,有学者结合心理学中认知模型的相关知识,基于韦伯-费希纳定律,提出一种认知评价模型:

$$P = \sum_{i=1}^N K_i \lg R_i \quad (3)$$

式中 P 为感觉量, K 为权重, R 为刺激量, N 为评价指标个数。

在认知评价模型中,应用心理学建立物理环境特征与人们感知反应之间的桥梁,通过构建两者之间精确的量化关系,以达到可以相对准确地以物理环境对人的心理刺激强度为依据进行相关评价^[7]。

2.2.2 利用韦伯-费希纳认知评价模型确定室内环境分级标准

利用伯-费希纳认知评价模型确定室内环境分级标准基于以下两个公式:

$$P_1 = \sum_{i=1}^n K_{1i} \lg R_{1i} \quad (4)$$

式中, R_1 是指以生理学中对人体生理参数的相关界定量为刺激源,同一个环境指标的不同含量对人体的物理刺激量; P_1 是指以生理学中对人体生理参数的相关界定量为刺激源,人体对同一个环境指标不同含量的刺激量所产生的心理感觉量; K_1 为权重值,因不同人的知识层面等因素而取值不同;

$$P_2 = \sum_{i=1}^n K_{2i} \lg R_{2i} \quad (5)$$

式中, R_2 是指以现实环境中对人体的客观刺激为刺激源,同一个环境指标的不同含量对人体的物理刺激量; P_2 是指以现实环境中对人体的客观刺激为刺激源,人体对同一个环境指标的不同含量的刺激量

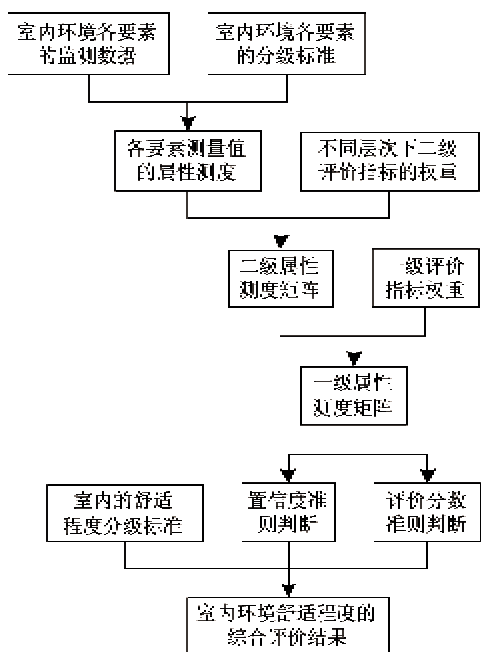


图1 室内环境舒适度总体评价流程

所产生的心理感觉量; K_2 为权重值,通常情况下取值恒定。

令 $P_1 = P_2$, 则得到

$$\sum_{i=1}^N K_{1i} \lg R_{1i} = \sum_{i=1}^N K_{2i} \lg R_{2i} \quad (6)$$

在实际计算过程中, K_1 、 K_2 是已知量,具体可根据已发放的调查问卷获得; R_2 是待测量,即为待确定的室内环境分级标准矩阵。

以下根据已发放的调查问卷,确定权重值 K_1 、 K_2 及刺激量 R_1 。随机选取 200 人作为评价主体发放调查问卷,根据知识层面、社会阅历等方面的不同将评价主体划分为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 四类,其中 L_1 类表示社会阅历十分丰富、知识层面十分广博,所占权重

K_1 为 0.4; L_2 类表示社会阅历丰富、知识层面广博,所占权重 K_1 为 0.3; L_3 类表示社会阅历较丰富、知识层面较广博,所占权重 K_1 为 0.2; L_4 类表示社会阅历不丰富、知识层面不广博,所占权重 K_1 为 0.1。按照上述划分方式,在发放调查问卷的 200 人中, L_1 类共 20 人, L_2 类共 60 人, L_3 类共 80 人, L_4 类共 40 人,确定不同类别中个人所占权重 K_1 分别为 0.02、0.005、0.0025、0.0025;正常情况下,权重 K_2 恒定取值为 1/200,即 0.005。同时,刺激量 R_1 由调查问卷所填内容获得。

根据反馈的调查问卷结果,应用式(6)确定室内环境的分级标准矩阵 R_2 , 如表 1 所示。

表 1 室内环境分级标准

环境类别	环境指标	单位	分级类别				
			S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
			清洁	未污染	轻度污染	中度污染	重度污染
室内空气 质量	甲醛	mg/m ³	0.04	0.11	0.16	0.54	0.92
	苯及同系物	mg/m ³	0.06	0.12	0.22	0.34	0.66
	一氧化碳	mg/m ³	5.00	10.47	33.30	49.91	208.75
	二氧化碳	mg/m ³	882.72	1962.46	2949.34	3931.65	9827.43
	氮氧化物	mg/m ³	4.62	9.44	18.87	38.77	76.55
	二氧化硫	mg/m ³	0.12	0.48	0.57	0.64	0.72
其它因素	酒精含量	mg/L	0.04	0.09	0.16	0.27	0.36
	烟雾浓度	ppm	22.93	47.69	108.36	500.52	816.65
	粉尘浓度	mg/m ³	2.13	4.00	8.44	12.44	18.52
噪声振动	噪声	dB	49.12	67.06	86.16	91.06	94.04
室内 微气候	温度(夏季空调暖系)	℃	25	26	28	31	34
	温度(夏季空调冷系)	℃	25	24	23	21	19
	温度(冬季采暖暖系)	℃	20	22	24	26	28
	温度(冬季采暖冷系)	℃	20	18	16	14	12
	湿度(夏季空调暖系)	%	60	65	70	80	95
	湿度(夏季空调冷系)	%	60	45	30	20	15
	湿度(冬季采暖暖系)	%	45	52	64	69	75
	湿度(冬季采暖冷系)	%	45	39	28	15	12

2.3 室内环境舒适度各级评价指标权重的确定

2.3.1 层次分析模型

在众多评价系统中,关于权重设计有多种方法,如模糊评价法、数理统计法、经验判断法和层次分析法等,每种方法都各有优劣^[8]。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是 20 世纪 70 年代中期由著名运筹学家 Saaty 提出,以不同决策方案的标准权重值为参考依据,将定量分析与定性分析相结合,以所涉及到将要评价的具体问题的实际情况和决策者所设定的将要达到的具体要求为依据,严格按照

评价对象所涉及的各要素相互之间的联系及属性关系,将评价对象划分为不同层次下的组成要素,构建一个具有丰富层次结构的分析模型,把已经划分的最高层次和最低层次的相对重要程度数值或相对优劣程度顺序排列出来,供决策者参考,择优选择^[9]。该方法可以解决多层次、多目标、难于完全定量分析的繁杂、模糊的问题,具有可靠度高、误差小的优点,其评价对象的因素一般不超过 9 个。其主要步骤如下:

(1) 根据具体问题的决策要求及实际情况,建

立层次结构模型。

(2) 将涉及的各要素划分为不同的层次结构,并说明各层次之间的从属关系。

(3) 通过向相关专家发放问卷的形式进行各要素间的相对重要程度的打分,并用相关矩阵表示打分结果,构造判断矩阵。如表 2 所示,通过引入适当的标度(这里采用 1~9 比较尺度)将对其作出的判断用数值的形式表示,构造判断矩阵,进而比较本层次各要素与某一要素间的相对重要性。假设 B 层次中的元素 $B_1, B_2, \dots, B_n$ 与上一层次 A 中的元素 A_k 有关系,则可以通过如表 3 所示的判断矩阵表示出来。

表 2 判断矩阵标度及其含义

标度	含义(两个因子相比较)
1	两者具有同样的重要性
3	前者(行)比后者(列)稍微重要
5	前者相对后者来说比较重要
7	前者相对后者来说非常重要
9	前者相对后者来说极其重要
2、4、6、8	介于上面两个相邻判断值的中间

表 3 判断矩阵的形式

A_k	B_1	B_2	...	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}
...	...	...	...	...
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nn}

(4) 求解判断矩阵的特征向量,进而对同一层次中各要素的权重进行计算:

(i) 判断矩阵 B 中各元素按行相乘:

$$\mu_{ij} = \prod_{j=1}^n b_{ij} \quad (7)$$

(ii) 将得到的 μ_{ij} 分别开 n 次方:

$$\mu_i = \sqrt[n]{\mu_{ij}} \quad (8)$$

(iii) 将方根向量 μ_i 正规化,得到特征向量 W_i :

$$W_i = \mu_i / \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (9)$$

(iv) 计算判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max}$:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} \quad (10)$$

式中, $(BW)_i$ 同样表示向量 (BW) 的第 i 个分量。

(5) 对上述分析结果进行验证,如存在较大误

差,需要结合相关专家的建议对该判断矩阵中各要素含量的取值重新调整。

定义

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

为衡量判断矩阵不一致程度的一致性指标,则判断矩阵的一致性准则可定义为

$$CR = CI/RI \quad (12)$$

式中 RI 为平均随机一致性指标,可通过查询表 4 获得; CR 为判断矩阵的一致性判断结果,如表 5 所示。

表 4 平均随机一致性指标 RI 值

n	3	4	5	6	7
RI	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36
n	8	9	10	11	12
RI	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54

表 5 判断结果的标准简表

条件	结果	说明
$CR < 0.1$	判断合理	判断矩阵有良好的一致性
$CR = 0.1$	判断较合理	判断矩阵有较好的一致性
$CR > 0.1$	判断不合理	判断矩阵不符合一致性要求,需要重新修正,直到一致性检验通过为止

2.3.2 利用层次分析模型确定室内环境舒适度的各级评价指标权重

根据评价指标体系设置的原则和指标选取的方法,结合各要素对人产生的心理、生理影响,运用层次分析模型构建室内环境舒适度的评价指标体系,如表 6 所示。

表 6 室内环境舒适度层次分析体系

室内环境的舒适程度(A)
室内微气候(B_1)、室内空气质量(B_2)、 噪声振动与环境(B_3)、其它因素(B_4)
温度(C_1)、湿度(C_2)、甲醛(C_3)、苯及同系物(C_4)、 一氧化碳(C_5)、二氧化碳(C_6)、氮氧化物(C_7)、二氧化硫(C_8)、 噪声振动(C_9)、酒精含量(C_{10})、烟雾浓度(C_{11})、 粉尘浓度(C_{12})

表 6 中,室内环境舒适度的评价指标体系分为 3 个层次,其中, A 表示第 1 层次(最高层次)、 B 表示第 2 层次、 C 表示第 3 层次。第 1 层次指室内环境的舒适程度;第 2 层次表示评价体系中的一级评价指标,包括 4 个同级评价指标:室内微气候、室内

空气质量、噪声环境与振动和其它因素;第3层次表示评价体系中的二级评价指标,包括12个同级评价指标:温度、湿度、甲醛、苯及同系物、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、噪声振动、酒精、烟雾和粉尘。

根据层次分析法的基本原理, B 层次中的元素 B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 与上一层次 A 有关,结合4个一级评价指标构造1个一级判断矩阵,如表7所示; C 层次中的元素 C_1 、 C_2 与上一层次 B 中的元素 B_1 有关, C 层次中的元素 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_8 与上一层次 B 中的元素 B_2 有关, C 层次中的元素 C_9 与上一层次 B 中的元素 B_3 有关, C 层次中的元素 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12} 与上一层次 B 中的元素 B_4 有关,结合二级评价指标构造4个二级判断矩阵,如表8~10所示,其中, C_9 与 B_3 是一一对应关系,此处无需给出该二级判断矩阵。

表7 一级评价指标判断矩阵

A (目标)	B_1	B_2	B_3	B_4
B_1	1	2	4	3
B_2	1/2	1	4	3
B_3	1/4	1/4	1	1/2
B_4	1/3	1/3	2	1

表8 室内微气候层次下二级指标判断矩阵

B_1 (目标)	C_1	C_2
C_1	1	2
C_2	1/2	1

表9 室内空气质量层次下二级指标判断矩阵

B_2 (目标)	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_3	1	3	3	5	4	6
C_4	1/3	1	2	4	3	5
C_5	1/3	1/2	1	3	2	4
C_6	1/5	1/4	1/3	1	1/2	2
C_7	1/4	1/3	1/2	2	1	2
C_8	1/6	1/5	1/4	1/2	1/2	1

表10 其它因素层次下二级指标判断矩阵

B_4 (目标)	C_{10}	C_{11}	C_{12}
C_{10}	1	1/3	1/4
C_{11}	3	1	1/3
C_{12}	4	3	1

利用式(7)~(12)对一级评价指标、二级评价指标的权重进行计算,从而得到室内环境舒适度的各级评价指标的权重,如表11所示。

表11 室内环境各级评价指标的权重

第1层次	第2层次		第3层次	
指标	指标	权重	指标	权重
室内环境的舒适程度 (A)	室内微气候 (B_1)	0.4530	温度(C_1)	0.6667
			湿度(C_2)	0.3333
	室内空气质量 (B_2)	0.3204	甲醛(C_3)	0.4046
			苯及同系物(C_4)	0.2336
			一氧化碳(C_5)	0.1591
			二氧化碳(C_6)	0.0638
			氮氧化物(C_7)	0.0937
			二氧化硫(C_8)	0.0452
	噪声振动与环境 (B_3)	0.0860	噪声振动(C_9)	1.0000
	其它因素 (B_4)	0.1406	酒精含量(C_{10})	0.1172
			烟雾浓度(C_{11})	0.2684
			粉尘浓度(C_{12})	0.6144

2.4 室内环境舒适度综合评价机制的构建

2.4.1 属性识别模型

20世纪90年代,程乾生基于模糊控制理论体系提出了属性识别理论,其中首次提出了属性集、有序分割类及属性测度空间的相关理论,用以解决环境评价等实际问题中被定性描述的度量问题,即以

属性识别准则和有序分割类为根本,对事物分割类进行有效的识别,从而较好地讨论定性描述的度量问题以及不同的定性描述问题之间、相应的度量之间的关系,克服其它识别方法在这方面的某些不足,如今属性识别理论已经被广泛应用于环境质量评价领域^[10]。

(1) 评价对象空间与属性集

评价对象空间是指所要评价的对象的整体,如 $X = \{\text{室内环境}\}$, 其中的元素 x 表示某一时刻的室内环境。属性空间 F 表示 X 中元素的某类属性,如研究室内环境质量状况时,可以令 $F = \{\text{室内环境的舒适程度}\}$ 。属性集表示属性空间 F 涉及的任何一种属性情况,可以看做是属性空间 F 中的相关子集,如 $A = \{\text{舒适}\}, B = \{\text{危险}\}$ 。

(2) 属性测度与属性测度空间

设 x 为评价对象空间 X 中的一个元素, A 为一个属性集, $x \in A$ 表示 x 具有属性 A ; $\mu(x \in A)$ 或 $\mu_x(A)$ 表示 x 具有属性 A 的程度,称为 $x \in A$ 的属性测度,其中 $\mu_x(A) \in [0, 1]$

设 (F, β) 为属性可测空间,如果 μ_x 满足

(i) $\forall A \in \beta, \mu_x(A) \geq 0$;

(ii) $\mu_x(F) = 1$;

(iii) 若 $A_i \in \beta, A_i \cap A_j = \emptyset (i \neq j)$, 则 $\mu_x[\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i] = \sum_{i=1}^{\infty} \mu_x(A_i)$, 则称 μ_x 为 (F, β) 上的属性测度,称 (F, β, μ_x) 为属性测度空间。

(3) 属性空间的分割与有序分割类

设 F 为评价对象空间 X 上的某类属性空间, $S_1, S_2, \dots, S_K$ 为属性空间中的 K 个属性集,若满足 $F = \bigcup_{i=1}^K S_i, S_i \cap S_j = \emptyset (i \neq j)$, 则称为属性空间 F 的分割。

属性集有强弱之分,对于室内环境来说,舒适程度越高越好,或者舒适程度越高越弱。因此,在属性集之间可以建立强序列或弱序列。 $A > B$ 表示属性集 A 比属性集 B 程度强;反之亦然。

如果 $S_1 < S_2 < \dots < S_K$ 或 $S_1 > S_2 > \dots > S_K$, 并且为属性空间 F 的分割,则称为有序分割类。

(4) 属性空间矩阵与属性分类标准矩阵

构建一个样本空间 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 对应一个评价指标空间 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_m\}$, 其中第 i 个评价对象 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 的第 j 个评价指标 $I_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的测量值可表示为 x_{ij} , 则向量 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$ 。

设研究对象 X 上的某类属性空间为 F , 共含有 K 个属性级别,属性空间 F 的有序分割类为 $(S_1, S_2, \dots, S_K)$, 且满足 $S_1 > S_2 > \dots > S_K$, 结合各评价指标的属性分类,可构造属性分类标准矩阵,即

$$\begin{matrix} & S_1 & S_2 & \cdots & S_K \\ \begin{matrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1K} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \cdots & \alpha_{2K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \cdots & \alpha_{mK} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中, $\alpha_{j1} < \alpha_{j2} < \dots < \alpha_{jK}$ 或 $\alpha_{j1} > \alpha_{j2} > \dots > \alpha_{jK}$ 。

(5) 属性测度的计算

以计算 x_{ij} 具有属性 S_l 的单指标属性测度 μ_{ijl} ($1 \leq l \leq K$) 为例。

假设 $\alpha_{j1} < \alpha_{j2} < \dots < \alpha_{jK}$ 当 $x_{ij} \leq \alpha_{j1}$ 时, $\mu_{ij1} = 1, \mu_{ij2} = \dots = \mu_{ijK} = 0$; 当 $x_{ij} \geq \alpha_{jK}$ 时, $\mu_{ij1} = 1, \mu_{ij2} = \dots = \mu_{ijK-1} = 0$; 当 $\alpha_{jl} \leq x_{ij} \leq \alpha_{j(l+1)}$ 时, $\mu_{ijl} = 0$ ($k < l$ 或 $k > l+1$), 其中 $\mu_{ijl} = \frac{|x_{ij} - \alpha_{j(l+1)}|}{|\alpha_{jl} - \alpha_{j(l+1)}|}, \mu_{ij(l+1)} = \frac{|x_{ij} - \alpha_{jl}|}{|\alpha_{jl} - \alpha_{j(l+1)}|}$ (13)

设定各指标权重向量为 $(w_1, w_2, \dots, w_m)$, 满足 $\sum_{j=1}^m w_j = 1, w_j \geq 0$ 。

由指标权重可得到属性测度:

$$\mu_{ik} = \mu(x_i \in S_k) = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk} \quad (14)$$

按照置信度准则,设定置信度 $\lambda (0.5 \leq \lambda \leq 1)$, 通常取 $0.6 \sim 0.7$, 通过计算

$$k_i = \min \{k: \sum_{l=1}^k \mu_{x_i}(S_l) \geq \lambda, 1 \leq k \leq K\} \quad (15)$$

则可认为 x_i 属于属性 S_{k_i} 。

按照评分准则,对各评价对象进行比较分析:

$$q_{x_i} = \sum_{l=1}^K n_l \mu_{x_i}(S_l) \quad (16)$$

式中, l 为 x_{ij} 的属性; q_{x_i} 为 x_i 的评价分数。

根据 q_{x_i} 的大小对 x_i 排序,分两种情况讨论:

(1) 当 $S_1 > S_2 > \dots > S_K, n_i = n+1-i$ 时,表示有序分割类 $(S_1, S_2, \dots, S_K)$ 中类别的重要性等间隔下降;

(2) 当 $S_1 < S_2 < \dots < S_K, n_i = 1$ 时,表示有序分割类中类别的重要性等间隔上升。

2.4.2 利用属性识别理论模型构建室内环境舒适度综合评价机制

(1) 评价对象空间 $X = \{\text{室内环境}\}$: 根据各要素的性质和影响程度的不同将评价对象空间划分为 X_1, X_2, X_3, X_4 共 4 个子集,分别表示为: $X_1 = \{\text{室内微气候}\}, X_2 = \{\text{室内空气质量}\}, X_3 = \{\text{噪声振动}\}$

与环境}, $X_4 = \{\text{其它因素}\}$, 其中的元素 x 表示某一时刻与评价对象空间的子集相对应的室内环境。

(2) 由第 2.3.2 部分所述, 将评价指标划分为 2 级。每个评价对象有 4 个一级评价指标, 构成 1 个一级评价指标空间: $I = \{I_{B1}, I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}\}$; 根据一级评价指标和二级评价指标的关系, 每个评价对象的子集有相应的二级评价指标, 构成 $I_{B1}, I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}$ 共 4 个二级评价指标空间, 分别表示为: $I_{B1} = \{I_{C1}, I_{C2}\}$, $I_{B2} = \{I_{C3}, I_{C4}, I_{C5}, I_{C6}, I_{C7}, I_{C8}\}$, $I_{B3} = \{I_{C9}\}$, $I_{B4} = \{I_{C10}, I_{C11}, I_{C12}\}$ 。

(3) 根据室内的舒适程度, 将属性空间 $F = \{\text{室内的舒适程度}\}$ 划分为 S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 共 5 个属性集, 分别表示为: $S_1 = \{\text{舒适}\}$, $S_2 = \{\text{较舒适}\}$, $S_3 = \{\text{较危险}\}$, $S_4 = \{\text{危险}\}$, $S_5 = \{\text{极危险}\}$, 且满足 $S_1 > S_2 > \dots > S_k$ 逐项减弱的有序分割。

(4) 按第 2.4.1 部分所述, 表 1 所示的室内环境各要素的分级标准, 即为室内环境各子集 X_1, X_2, X_3, X_4 的属性分类标准矩阵。

(5) 按置信度原则, 取 $\lambda = 0.7$ 。

(6) 按评价分数原则, 取 $n_i = n + 1 - i$ 。

利用式(13)~(16), 结合室内环境的分级标准和室内环境舒适度一级、二级评价指标的权重, 计算一级、二级属性测度矩阵, 按照置信度准则、评价分数准则进行判断, 进而得到室内环境舒适程度的综合评价结果。

3 室内环境舒适度测评系统设计

3.1 系统总体设计

基于所构建的室内环境舒适度综合评价理论, 设计并搭建了相应的测评系统, 如图 2 所示。工作过程中, 室内环境某一要素超过预定指标或相关评价分数低于预定阈值时, 声光报警启动, 液晶显示屏(LCD)自动切换至报警界面, 相应指示灯立即开启。

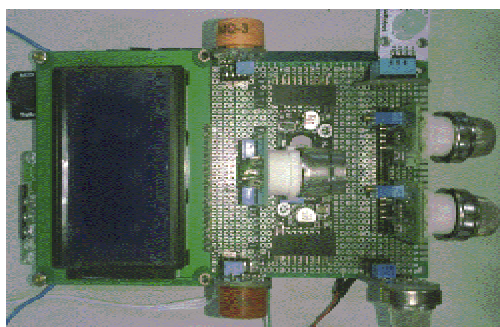


图2 系统硬件实物图

3.2 传感器设计

如表 12 所示, 分别基于 MQ-2、MQ-3、MQ-7、MQ-135、MQ-138、MG-811 等气敏元件对传感器进行设计, 并通过建立输出的模拟电压量、AD 值、各要素含量的对应关系, 实现对影响室内环境舒适度关键指标的含量检测, 并判断其是否超标^[11]。

表 12 气敏元件型号说明简表

型号	说明
MQ-2	烟雾气敏元件
MQ-3	酒精气敏元件
MQ-7	一氧化碳气敏元件
MQ-135	氨气、硫化物类气敏元件
MQ-138	醛类气敏元件
MG-811	二氧化碳气敏元件
PPD42NS	粉尘传感器
DHT11	数字温湿度传感器

由于各检测模块原理相近, 且因篇幅所限, 下面以甲醛含量检测模块为例进行阐述。

甲醛含量检测电路如图 3 所示, 该电路由 MQ-138 型半导体气敏元件、信号采样电路、LM393 双电压比较器、继电器、发光二极管等器件构成。采用 +5V 直流稳压电源为电路供电。

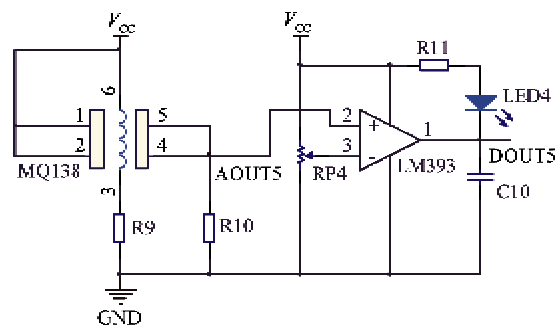


图3 甲醛含量检测电路

当空气中甲醛含量超过一定浓度时, 气敏元件 A-B 两电极间的电阻值迅速降低, A-B- R_2 支路中的电流迅速增大, 使得采样电阻 R_2 的分压迅速增大。 R_2 两端的电压信号送到 LM393 比较器 2 脚进行阈值判断, 若超过 LM393 比较器 3 脚的电压, 则引起 LM393 比较器 1 脚的数字输出端 DO 输出低电平, 并伴随声光报警。反之, DO 端输出高电平。

标准条件下, 在没有检测到甲醛含量之前气敏元件 A-B 脚间的电阻值 R_0 为 $1.033\text{k}\Omega$, 加热端 H_1 - H_2 间的电阻值 R_{HH} 为 $0.040\text{k}\Omega$ 。半导体气敏元件与采样电阻串联构成分压电路, 采样点为采样电

阻的分压。根据分压电路的工作原理,模拟端 AO 输出的电压为

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_2 + R_s} \times V_{CC} \quad (17)$$

式中, R_2 为定值采样电阻, $R_2 = 1\text{k}\Omega$; R_s 为敏感体电阻,随酒精浓度而变化; V_{CC} 为 +5V 直流稳压电源输出; V_{OUT} 为模拟端 AO 的输出电压。

如图 4 所示, R_s/R_0 与甲醛浓度是近似线性的关系。取其中 10 个样本点,并根据 V_{OUT} 和 R_s 的关系,将 R_s/R_0 与甲醛浓度的对应关系转化为模拟端输出的电压 V_{OUT} 与甲醛浓度的对应关系。然后通过 STM8S207 内部的 10 位连续渐进式模数转换器 ADC2,把模拟端 AO 输出的电压 V_{OUT} 转换为相应的 AD 值,对 10 个采样点之间的线段进行线性拟合,可以得到经转换后的 AD 值与甲醛浓度的对应关系。

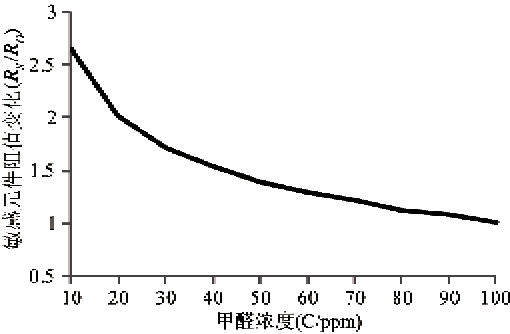


图 4 MQ-138 型气敏元件特性曲线

3.3 显示、报警、存储功能设计

LCD 显示拥有常置、测量数据及评价结果共 3 类、16 页显示界面。

LabVIEW 人机界面显示具有数据处理、时钟显示、曲线显示、数据存储等功能^[12]。

依据人的视觉特性,选用不同颜色的 LED 作为信号灯和指示灯,分别代表不同的属性级别,如表 13 所示。显示、报警、存储等功能的举例分析如第 4 部分所述。

表 13 系统信号灯、指示灯的含义说明

颜色	含义	说明
白	舒适	室内环境舒适度处于 S_1 属性等级
绿	较舒适	室内环境舒适度处于 S_2 属性等级
黄	较危险	室内环境舒适度处于 S_3 属性等级
红	危险	室内环境舒适度处于 S_4 属性等级
紫	极危险	室内环境舒适度处于 S_5 属性等级
蓝	视觉报警	室内环境舒适度达到 S_4 属性等级
	声光报警	室内环境舒适度达到 S_5 属性等级

4 室内环境舒适度测评系统的测试结果及数据分析

测试过程所采用的软硬件环境如表 14 所示。随机选取一间居室作为测试对象,以室内的酒精、打火机、香烟、油漆等为刺激源,针对系统的有效性进行测试。表 15 所示为某一时刻的测量数据。

表 14 系统测试的软硬件环境简表

类别	指标	配置
硬件环境	处理器	Pent. T4200
	内存	2.00GB
	硬盘	250.00GB
软件环境	操作系统	Windows XP SP3
	编译部分	IAR For STM8 V1.40
	显示部分	LabVIEW 2012

表 15 某一时刻室内环境监测数据表

类别	序号	指标	浓度	单位
室内微气候	1	温度(夏季空调)	24	℃
	2	湿度(夏季空调)	42	%
室内空气质量	3	甲醛	0.07	mg/m ³
	4	苯及其同系物	0.09	mg/m ³
	5	一氧化碳	9.25	mg/m ³
	6	二氧化碳	2230.25	mg/m ³
	7	氮氧化物	11.52	mg/m ³
	8	二氧化硫	0.54	mg/m ³
噪声振动	9	噪声振动	82.46	dB
其它因素	10	酒精含量	0.14	mg/L
	11	烟雾浓度	150.26	ppm
	12	粉尘浓度	4.25	mg/m ³

室内环境舒适度测评系统接收到该时刻的测量数据后,可以得出这一时刻室内环境的 4 个子集 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 测量值的属性测度:

室内微气候:(24,42);

室内空气质量:(0.07,0.09,9.25,2230.25,11.52,0.54);

噪声振动与环境:(82.46);

其它因素:(0.14,150.26,4.25)。

下面计算二级属性测度矩阵,以评价对象空间 $X = \{\text{室内环境}\}$ 的子集 $X_2 = \{\text{室内空气质量}\}$ 为例:

该时刻室内甲醛的测量值为 0.07mg/m^3 ,由于 $0.04 \leq 0.07 \leq 0.11$,则利用式(13)可以得到:

$$\mu_{d1} = |0.07 - 0.11| / |0.04 - 0.11|$$

$$= 0.57$$

$$\mu_{i12} = |0.07 - 0.04| / |0.04 - 0.11|$$

$$= 0.43$$

$$\mu_{i13} = \mu_{i14} = \mu_{i15} = 0$$

同理,得到室内空气质量层次下各二级指标测量值的属性测度,如表 16 所示。

表 16 室内空气质量层次下各指标测量值的属性测度

指标名称	指标个数	μ_{i1}	μ_{i2}	μ_{i3}	μ_{i4}	μ_{i5}
甲醛	$l=1$	0.57	0.43	0	0	0
苯及其同系物	$l=2$	0.50	0.50	0	0	0
一氧化碳	$l=3$	0.22	0.78	0	0	0
二氧化碳	$l=4$	0	0.73	0.27	0	0
氮氧化物	$l=5$	0	0.78	0.22	0	0
二氧化硫	$l=6$	0	0.33	0.67	0	0

利用式(7)~(10),求解表 9 中构造的室内空气质量层次下的二级指标判断矩阵的特征向量。相关数据如表 17 所示。经计算,该判断矩阵的最大特征根 $\lambda_{\max} = 6.1667$ 。

表 17 室内空气质量层次下二级指标权重计算相关数据

指标	μ_{ij}	μ_i	W_i	$(BW)_i$
$i=1$	1080	3.2031	0.4046	2.5477
$i=2$	40	1.8493	0.2336	1.4490
$i=3$	4	1.2599	0.1591	0.9704
$i=4$	1/60	0.5054	0.0638	0.3934
$i=5$	1/6	0.7418	0.0937	0.5703
$i=6$	1/480	0.3574	0.0452	0.2779

由表 4 所示的平均一致性指标 RI 值表可知,当 $n=6$ 时, $RI=1.26$ 。利用式(11)、(12)可以得到

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} = \frac{6.1667-6}{6-1} = 0.0333$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0333}{1.26} = 0.0264$$

判断矩阵的一致性检验指标 $CR < 0.1$, 故该判断矩阵具有良好的一致性,其特征向量 W_i 经正规化处理后得到室内环境层次下的二级指标权重,分别为 0.4046、0.2336、0.1591、0.0638、0.0937 和 0.0452。

同理可以根据表 7、表 8 和表 10 构造的一级指标判断矩阵和其它 3 个二级指标判断矩阵计算相应的 $\lambda_{\max}$ 、 RI 、 CI 和 CR , 如表 18 所示。

表 18 各级评价指标的 $\lambda_{\max}$ 、 RI 、 CI 和 CR 值

判断矩阵	$\lambda_{\max}$	RI	CI	CR
室内环境	4.0813	0.89	0.0271	0.0305
室内空气质量	6.1667	1.26	0.0333	0.0264
其它因素	3.0736	0.52	0.0368	0.0708

由于室内微气候和其它因素层次分别包含两个和一个评价指标,对应的 RI 值均为 0,故无需列出。将判断矩阵相应的特征向量正规化后得到的各评价指标权重如表 11 所示。

利用式(14),可以得到

$$\begin{aligned}\mu_{i1} &= W_1 \cdot \mu_{i11} + W_2 \cdot \mu_{i21} + W_3 \cdot \mu_{i31} + W_4 \cdot \mu_{i41} \\ &\quad + W_5 \cdot \mu_{i51} \\ &= 0.4046 \times 0.57 + 0.2336 \times 0.50 + 0.1591 \\ &\quad \times 0.22 \\ &= 0.382424\end{aligned}$$

同理可知, $\mu_{i2} = 0.549452$, $\mu_{i3} = 0.068124$, $\mu_{i4} = 0$, $\mu_{i5} = 0$ 。由此,可以得到室内空气质量层次下的二级属性测度矩阵: $[0.382 \ 0.550 \ 0.068 \ 0 \ 0]$ 。

同理可以计算出其它 3 个一级评价指标的二级属性测度矩阵:

室内微气候: $[0 \ 0.933 \ 0.067 \ 0 \ 0]$;

噪声振动与环境: $[0 \ 0.194 \ 0.806 \ 0 \ 0]$;

其它因素: $[0 \ 0.614 \ 0.357 \ 0.029 \ 0]$ 。

取置信度 $\lambda=0.7$,利用式(15),按照置信度原则对 4 个一级评价指标进行判断,可知室内微气候、室内空气质量处于 S_2 等级,为较舒适;噪声振动与环境、其它因素处于 S_3 等级,为较危险。

取 $n_i = n+1-i$,利用式(16),按评价分数原则进行判断,可知 4 个一级评价指标的评价分数分别为 3.933、4.314、3.194 和 3.585 分,按照属性空间室内环境的舒适程度由高到低排序:室内空气质量,室内微气候,其它因素,噪声振动与环境。

评价对象空间室内环境共包含 4 个一级评价指标,由前所述,其指标权依次为 0.4530、0.3204、0.0860、0.1406,则室内环境一级属性测度矩阵为 $[0.122 \ 0.702 \ 0.172 \ 0.004 \ 0]$ 。

取置信度 $\lambda=0.7$,按照置信度原则对室内环境进行判断,可知室内环境处于 S_2 等级,为较舒适,即此刻室内环境为较舒适的可能性在 70% 以上。

通常情况下,室内环境舒适度测评系统采用置信度原则,将得到的属性等级表示为室内环境舒适度的综合评价结果,但有时为了对同一属性集内的

舒适程度进行比较分析,也采用评价分数原则,将得到的评价分数表示为室内环境舒适度的综合评价结果。

取 $n_i = n + 1 - i$, 按评价分数原则进行判断,可知此时室内环境舒适度的评价分数为 3.942 分。

LabVIEW 上位机、LCD 显示屏监测到该时刻室内环境舒适度的测评曲线如图 5、图 6 所示。

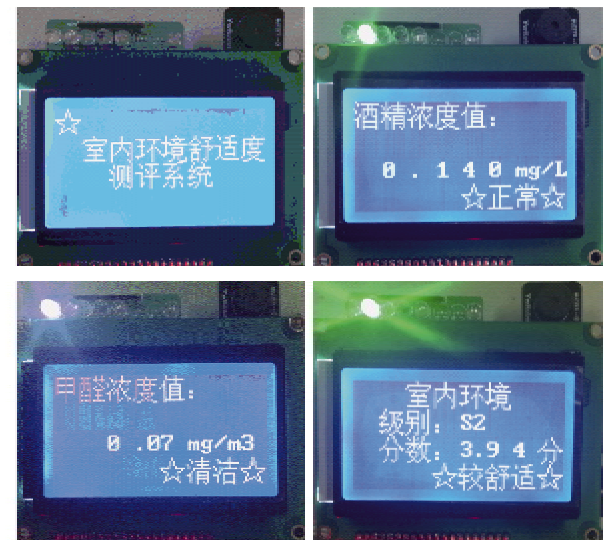


图 5 LCD 显示界面样例



图 6 LabVIEW 前面板测评曲线样例

选取已装修时间分别为 3、6、9、12 个月的同款居室作为测试对象,以等量的酒精、香烟及内饰材料等作为刺激源,同样针对系统的有效性进行测试,相关数据如表 19 所示。

测试过程中,虽然刺激源的含量、刺激程度等均相同,但刚刚装修过的居室,内饰材料等污染物会释放大量的醛类、醇类、苯系物、硫化物等有害物质,周围居室的装修等也会加重噪声污染,导致其舒适程度偏低。测试结果也表明,室内环境舒适度的评价分数随着已装修时间的增加而逐渐升高,与实际情况相吻合。

表 19 系统可用性测试数据简表

类别		3 个月	6 个月	9 个月	12 个月
指标含量 测试结果	温度(℃)	23	24	23	24
	湿度(%)	54	52	48	49
	甲醛(mg/m³)	0.33	0.29	0.18	0.08
	苯及同系物(mg/m³)	0.17	0.12	0.08	0.10
	一氧化碳(mg/m³)	20.23	18.76	8.25	4.00
	二氧化碳(mg/m³)	3646.98	3266.64	1655.45	935.78
	氮氧化物(mg/m³)	35.56	32.75	16.25	7.25
	二氧化硫(mg/m³)	0.60	0.52	0.44	0.40
	噪声与振动(dB)	80	82	79	65
	酒精(mg/L)	0.11	0.12	0.08	0.04
	烟雾(ppm)	120.87	82.95	100.65	79.56
	粉尘(mg/m³)	4.50	4.80	4.20	4.00
评价分数 测试结果	室内微气候(分)	3.40	4.12	3.30	4.07
	室内空气质量(分)	3.02	3.40	4.02	4.39
	噪声振动与环境(分)	3.91	3.66	4.00	4.51
	其它因素(分)	3.49	3.52	3.79	4.31
	综合评价(分)	3.29	3.64	3.78	4.30

5 结 论

本文构建了一套较为完善的室内环境舒适度综合评价理论,并利用 STM8S207 单片机、稳压电源、

液晶显示屏、气体传感器等硬件及相关软件,设计了一套能够实时检测、评价、显示、报警、存储室内环境各要素指标的舒适度测评系统,在实测中达到了预期效果。主要的创新性工作有:(1)将热环境中的

舒适性与空气环境中的安全性相融合,把室内的复杂环境细分化,基于属性识别模型、层次分析模型、改进的韦伯-费希纳定律评价模型,从室内环境的分级标准、室内环境舒适度各级评价指标的权重以及室内环境舒适度的综合评价机制3个方面,对室内环境舒适度测评理论进行了较为完善的构建;(2)从心理学、人机工程学的角度对测评系统进行了较为完善的硬件设计。经实际测试,室内环境舒适度综合评价理论可行、有效,硬件评测系统测试效果好、操作性强、便携性好。今后需要进一步改进分级标准及数据处理方法。

参考文献

- [1] 李昕,康健楠,洪文学等. 基于图表达原理的室内舒适度评价方法研究及其应用. 传感技术学报, 2006, 19(4): 1094-1096
- [2] Frontczak M, Andersen R V, Wargocki P. Questionnaire survey on factors influencing comfort with indoor environmental quality in Danish housing. *Building & Environment*, 2012, 50: 56-64
- [3] 闫业超,岳书平,刘学华等. 国内外气候舒适度评价研究进展. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1119-1123
- [4] 谢东坡,秦华锋,余成波. 基于模糊理论的室内环境舒适度检测系统研究. 中国测试技术, 2008, 34(4): 126-128
- [5] 张显辉,李长玉. 浅谈室内环境污染问题. 环境科学与管理, 2008, 33(10): 64-66
- [6] Portugal R D, Svaite B F. Weber-Fechner law and the optimality of the logarithmic scale. *Minds & Machines*, 2011, 21: 73-81
- [7] Antonio G S, Belmontes J A, Nicolau J M. Assessing landscape values: a proposal for a multidimensional conceptual model. *Ecological Modelling*, 2003, 168: 319-341
- [8] 王红卫,祁超,魏永长等. 基于数据的决策方法综述. 自动化学报, 2009, 35(6): 820-833
- [9] 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 层次分析法的研究与应用. 中国安全科学学报, 2008, (5): 148-152
- [10] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(1): 12-18
- [11] Esteban J, Starr A, Willetts R, et al. A review of data fusion models and architectures: towards engineering guidelines. *Neural Computing & Applications*, 2005, 14: 273-281
- [12] 冯健,宋晓龙. 基于虚拟仪器技术的分布式采集系统设计. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 619-621

Theoretical study on comprehensive evaluation of indoor environmental comfort and design of a evaluation system

Cui Fayi, Xin Sixu

(Measurement Technology and Instrumentation Key Lab of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract

Based on the analysis of the specific meaning of indoor environment, the relationship between the indoor environment and the comfort sensing was established. The things such as the origin and disadvantage of important factors affecting indoor persons of a persons-machine-environment system involving interior environment were inductively analyzed, and then, the attribute recognition theoretical model, the analytic hierarchy process model and the Weber-Fechner law model were combined. On the basis of the grading standards of indoor environment, the weights of all levels of evaluation index and the synthesized evaluation mechanism of interior environment, a more perfect comfort comprehensive evaluation theory for the indoor environment was built. Based on these achievements, and a comfort evaluation system for real time detection, evaluation, display, alarm, storage of the key elements of interior environments was designed by using the hardwares of STM8S207 microcontroller, steady power supply, LCD display, sensors hardwares and relational software. The system achieved the desired effect in practical applications.

Key words: indoor environmental comfort, attribute recognition model, analytic hierarchy process model, improved Weber-Fechner law evaluation model, STM8S207 microcontroller, sensors