

•绿色建筑与智能建造•

DOI:10.12454/j.jsuese.202500438



本刊网刊

建筑策划与后评估中基于群决策的指标权重迭代模型

庄惟敏^{1,2}, 景 泉³, 胡朝浪^{4*}, 李若星², 苗志坚², 胡奇晓⁴, 李炎昊⁴

(1.清华大学 建筑学院,北京 100084;2.清华大学建筑设计研究院有限公司,北京 100089;

3.中国建筑建筑设计研究院有限公司,北京 100044;4.四川大学 数学学院,四川 成都 610065)

摘要:建筑策划与后评估中涉及众多多指标决策的场景,如何结合具体决策环境量化建模以确定指标权重具有重要工程意义。在群决策中既需要考虑指标权重,还需考虑每一位决策者(专家)的权重。传统方法是独立建模分别确定两者,但缺乏对两者的协同优化。因此,本文提出了一种同时输出两者的迭代模型。首先,利用专家个人评价与专家群体评价之间的一致性建立确定专家权重的优化模型,该模型在计算一致性时考虑了不同指标的重要性;然后,利用专家权重直接聚合评价结果获得指标权重;最后,基于专家权重和指标权重的相互影响建立迭代模型。借助建筑策划与后评估中的两个工程案例进行了数值验证,结果表明:1)在绿色性能评价案例中,9位专家对96项底层指标进行语义评价,模型经8步迭代收敛,相邻步指标权重差的无穷范数降至 10^{-10} 量级;2)与均分专家权重法相比,迭代模型输出的指标权重区分度更高,且办公建筑与旅游建筑的指标排序差异符合功能特征;3)在后评估案例中,5位专家对博物馆与体育馆的69项指标进行评价,模型均于迭代7~9步稳定收敛;4)同一批专家在不同建筑类型下的权重分布呈现显著差异,指标权重有效反映了博物馆侧重文化表达、体育馆侧重晚间照明等工程实际。该模型具有良好的收敛性,在工程应用中具有可行性和有效性。

关键词:建筑策划与后评估;多指标群决策;指标权重;专家权重;迭代模型

中图分类号:TU12

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)02-0138-09

在建筑策划与后评估中,随着决策环境及问题日益复杂,用于解决评价、决策等问题的多指标群决策方法获得广泛关注^[1-6]。在多指标群决策中,指标体系是必不可少的一部分,其中每个指标反映了决策问题的不同方面,常见的指标有室内热环境、外围护结构性能、结构抗震、消防安全、智能化设备等。指标权重反映了指标在整体决策过程中的相对重要性。例如,规划设计大型公共建筑时由于预算有限,不能将每一方面的设计都达到极致,需要优先照顾某些方面;此外,针对不同类型的公共建筑,相同指标集合里各个指标的重要性排序在行业专家内部也有些许差异,所以对指标重要性进行排序在实践中十分必要^[1-2]。因此采用何种方式确定专家权重和指标权重非常关键。

建筑策划包含了建筑项目早期的关键阶段,特指在建筑学领域内建筑师根据总体规划的目标设定,从

建筑学角度出发,不仅依赖经验和规范,更以实态调查为基础,运用计算机等近现代科技手段对研究目标进行客观分析,最终定量地得出实现既定目标所应遵循的方法及程序的研究工作^[2-3]。在强调可持续发展的今天,如何平衡可持续性、经济性、功能性成为了一个难题。Jin等^[4]研究了在建筑策划领域的智能和数字方法、可持续性和实践、项目管理和决策支持等6个主题上中国与其他国家之间的差异。Lazar等^[5]回顾了建筑可持续性评估系统(BSAS)的发展;Momoh等^[6]分析了权重和聚集系数系统在开发城市可持续性评估工具(SUCCEED)中的应用;Khan等^[7]在评估体系中定义了一个受异速生长启发的城市缩放指标。在可持续评估过程中,他们都强调了指标权重的重要性。不仅仅局限于可持续性评估,Li等^[8]还研究了确定历史建筑价值评估指标权重的重要性。

收稿日期:2025-06-10 修回日期:2025-09-01 网络出版日期:2025-10-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3801300)

作者简介:庄惟敏(1962—),男,中国工程院院士,教授,博士。研究方向:建筑设计及其理论。E-mail:zhuangwm@tsinghua.edu.cn

*通信作者:胡朝浪,副教授,E-mail:huchaolang@scu.edu.cn

后评估(post-occupancy evaluation)是对建成并使用一段时间后的建筑及其环境进行评价的一套系统程序和方法^[2]。其原理是通过对建筑设计的预期目的与实际使用情况加以对比收集反馈信息,以便为将来同类建筑与环境的设计和决策提供可靠的客观依据^[9]。作为建筑设计全生命周期中重要的一环,后评估是对建成环境的反馈和对建设标准的前馈,在对建筑的经验反馈、同类型建筑的效能评价和标准优化等方面具有重要价值。与建筑策划阶段相同,后评估中对各指标权重的决策也是一个重要且复杂的问题。在后评估中,确定指标权重最常用的是层次分析法(AHP)和模糊综合评价(FCE),Chen等^[10]介绍了一种通过FCE和AHP的整合来评估项目的方法,有效地将定性指标转化为定量数据,为复杂项目的后评价提供了新的框架。在此基础上,Wang等^[11]从指标体系结构和AHP方法的局限性角度,提出了一种改进的基于区间数的网络分析层次过程(ANP)模型来确定各个指标的权重。

指标权重确定方法分为以下3类:1)主观赋权法,常见的主观赋权法有层次分析法^[12]、专家调查法(Delphi法)等,其优点是可根据决策者或者属性的重要性排序进行赋权,但主观性较强;2)客观赋权法,常见的有熵权法^[13]、离差最大化方法等;3)主客观结合赋权法,常见的有目标规划法等,是依据指标数据的自身特征或指标间关系进行权重计算,优点是客观性较强,有较强的数理依据,但没有考虑决策者主观意向,可能出现与实际不符的现象。针对主观赋权法、客观赋权法的优缺点,既考虑决策者的主观意向又考虑客观数据内在规律^[14],可使得结果更加真实、可靠,在建筑策划与后评估方法的相关领域,有大量学者研究了如何确定指标权重。Mao等^[15]讨论了绿色建筑评价体系中确定权重和指标的各种方法的操作流程,包括德尔菲法、模糊评价法等。Zhao等^[16]通过Delphi调查法和AHP方法,研究确定了综合评估模型每个指标的相对权重,对于建筑策划中的可持续性评估至关重要。Li等^[17]使用Delphi调查法选择指标,并通过贝叶斯最佳最差方法确定权重,为指标权重确定提供了新的视角。

多专家集体评价多指标重要性是一种常见的确定目标对象指标权重的主观赋权法。在这个过程中,专家作为决策的主体。由于工作经验和专业程度不同,每位专家的权重也需要确定^[18]。专家权重确定方法同样分为3类:主观赋权法、客观赋权法^[19]和主客观结合赋权法。主客观结合赋权法的特点是通过一组关于指标权重的已知的主观数据信息,采用客观赋权法确定专家权重。Herrera-Viedma等^[20]提出了一种基于

加性一致性和顺序一致性的不完整模糊偏好关系确定专家权重新方法,为处理不完整模糊偏好关系中的群体决策问题提供了新的视角和方法。Yue^[21]讨论了在群体决策环境中,特别是在混合偏好表示的情况下,如何使用基于熵的方法来确定专家权重。Dong等^[22]提出了一种基于多属性互求矩阵生成专家权重的动态方法,这个共识框架可以有效地管理一些专家的不合作行为。Hu等^[23]提出了一种基于优化模型的区间直觉模糊群决策方法,通过构建专家权重和属性权重的优化模型,将主客观权重分配方法相结合。Yue^[24]提出了一种扩展的TOPSIS法,对确定带有不确定信息的专家权重十分有效。Liu等^[25]从优化角度出发,提出一种用于专家权重确定的优化模型,使得最优权重与专家评价到整体一致评分点的距离严格成反比,具备更强的可解释性和更低的模型偏差。

现有研究多数仅侧重于单独确认专家权重或指标权重,但缺乏对两者的协同优化。因此,本文在Liu等^[25]提出的专家权重确定模型基础上,构建了一个指标权重和专家权重相互校正的迭代模型,并应用于建筑策划与后评估的决策场景进行验证,主要内容如下:

1)通过加权距离改进Liu等^[25]提出的专家权重确定模型,在考虑专家评价结果一致性时加入了指标权重的影响。

2)建立了一个迭代模型,在模型中专家权重和指标权重相互校正,直至模型收敛得到最终的专家权重和指标权重。

3)通过建筑策划与后评估中的各一个实际案例展示了迭代模型的收敛性,并通过比较不同类型建筑指标权重说明本文提出的迭代模型有效性。

1 确定指标权重的迭代模型

1.1 问题描述及符号假设

在建筑策划阶段和后评估阶段的各个决策点位有众多的群决策问题,如何确定各个评价指标在决策过程中的相对重要性至关重要。比如一个被评价对象有多个指标,为了获得它们的重要性排序,专家需要主观地对指标体系中的每个底层指标相对于被评价对象单独进行重要性评价,然后通过量化模型聚合这些主观评价而获得指标权重,从而获得各指标的重要性排序。在这一群体决策过程中,假设专家有 m 位,被评价的对象 O 有 n 个指标,其中,第 j 个专家记为 d_j ,被评价对象 O 的第 i 个指标记为 c_i 。不妨记:

1) m 位专家的权重 $w_j(j=1,2,\dots,m)$ 构成专家权重向量 $w=[w_1 \ w_2 \ \dots \ w_m]^T$,其中, $\sum_{j=1}^m w_j=1, 0 < w_j < 1$ 。

2) n 个指标的权重 $\bar{\omega}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 构成指标权重向量 $\bar{\omega} = [\bar{\omega}_1 \ \bar{\omega}_2 \ \dots \ \bar{\omega}_n]^T$, 其中, $\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i = 1, 0 < \bar{\omega}_i < 1$ 。

图 1 为使用迭代法确定指标权重的流程。

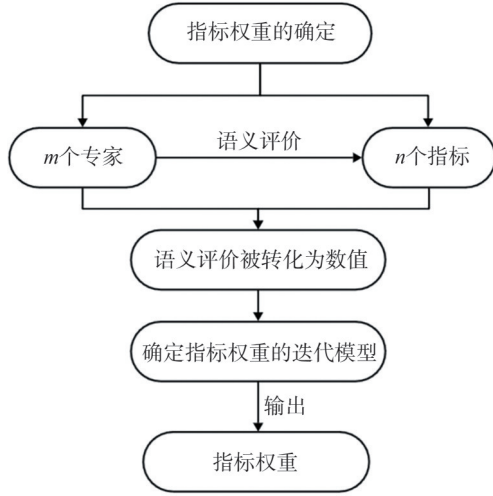


图 1 确定指标权重的流程图

Fig. 1 Flowchart of determining indicator weights

首先,需要 m 个专家对 n 个指标进行语义评价,本文采用五级语义评价法,并根据实际情况转化为数值。不妨记第 j 个专家对第 i 个指标的重要性评价可转化为数值 b_{ij} , 定义 $B = (b_{ij})_{n \times m}$, 将矩阵 B 按列分块,有 $B = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_m]$, 列向量 α_j 代表了第 j 个专家对目标对象 O 的 n 个指标的评价量化值。

其次,在得到每个专家对 n 个指标的评价后,使用本文提出的迭代模型可确定每个指标的权重。具体而言,在利用一致性建立优化模型确定专家权重时加入指标权重的影响,同时在已知专家权重的前提下直接加权聚合多个专家的指标评价结果获得指标权重。

基于此,本文利用专家权重和指标权重的相互影响构建了一个迭代模型,该模型能同时输出专家权重和指标权重。模型确定指标权重后实质上获得了指标重要性的一个排序,该排序一方面可以在后续的决策中发挥作用,另一方面可以区分相对重要和相对不重要的指标。

1.2 基于指标权重的专家权重确定模型

不同专家经验丰富程度以及对相关领域的了解程度不同,因此不同专家的重要性不同,应赋予经验丰富或对决策项目了解充分的专家更高的权重。当某位专家的评价结果与所有专家的一致评价结果差异越小,说明该专家的评价结果越有参考价值,从而其权重越大;反之,若差异越大,则权重越小。由式(1)^[25]确定专家权重的优化模型:

$$\min_w g(w) = \min_{j=1}^m \|\alpha_j - \eta\|_2 = \min_{j=1}^m \left((\alpha_j - \eta)^T (\alpha_j - \eta) \right)^{1/2}, \quad \text{s.t.} \sum_{j=1}^m w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1 \quad (1)$$

式中: η 为专家群体一致性评价向量, $\eta = \sum_{j=1}^m w_j \alpha_j$; $\|\alpha_j - \eta\|_2$ 为第 j 个专家意见与群体意见的分歧,由距离体现,距离越小分歧越小;目标函数 $\sum_{j=1}^m \|\alpha_j - \eta\|_2$ 表示整个集体内部总的分歧,函数值越小分歧越小,此处希望函数值越小越好。

模型(式(1))的结果具备作决策所期望的特点:个体评价与一致性评价距离越短,个体权重越大,否则权重越小;事实上,文献[25]证明了该优化模型获得的专家权重与专家评价同一致性评价之间的距离成“完美合理性”的反比关系^[25]。模型(式(1))通过向量二范数距离来表征分歧,其特点是将代表每一个指标的分量看作是等权重的,然而,工程实践中不同指标的重要性常常是不同的,故上述优化模型对于距离定义的不足在于计算的时候并未考虑这种重要性差异。因此,本文考虑引入加权距离来表征不同指标的重要性以改进模型(式(1))。思路是先在向量空间中引入一种特殊的 A -内积,并由此导出一种范数,进而导出加权距离。

首先,设 V 是实线性空间,对 V 中的任意两个向量 x 和 y , 给定任一对称正定矩阵 A , 则可定义 A -内积为:

$$(x, y)_A = x^T A y \quad (2)$$

利用 A -内积,可以定义 A -范数为:

$$\|x\|_A = \sqrt{(x, x)_A} \quad (3)$$

于是,可由 A -范数导出加权的 A 距离:

$$d_A(x, y) = \|x - y\|_A \quad (4)$$

令 $A(\bar{\omega}) = \text{diag}[\bar{\omega}_1^2 \ \bar{\omega}_2^2 \ \dots \ \bar{\omega}_n^2]$, 其中, $\bar{\omega}_i$ 是第 i 个指标的权重,满足 $\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i = 1, \bar{\omega}_i > 0$ 。则改进的专家权重确定模型如下:

$$\min_w f(w) = \min_{j=1}^m \|\alpha_j - \eta\|_{A(\bar{\omega})} = \min_{j=1}^m \sqrt{(\alpha_j - \eta)^T A(\bar{\omega})(\alpha_j - \eta)} = \min_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i^2 (b_{ij} - \eta_i)^2 \right)^{1/2}, \quad \text{s.t.} \sum_{j=1}^m w_j = 1, 0 \leq w_j \leq 1 \quad (5)$$

式中, η_i 为 η 的第 i 个分量,代表第 i 个指标的专家群体一致性评价。特别地,取指标权重向量 $\bar{\omega} =$

$$\left[\frac{1}{n} \quad \frac{1}{n} \quad \dots \quad \frac{1}{n} \right]^T。$$

$A(\bar{\omega})$ 为数量矩阵 $\frac{1}{n^2}I$,优化模型式(1)此时可写为:

$$\begin{aligned} \min_w g(w) &= \min \sum_{j=1}^m \|\alpha_j - \eta\|_I = \\ \min \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{1}{n^2}(\alpha_j - \eta)^T I (\alpha_j - \eta)} &= \\ \min \sum_{j=1}^m \frac{1}{n} \sqrt{(\alpha_j - \eta)^T (\alpha_j - \eta)} &= \\ \min \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \left(\sum_{i=1}^n (b_{ij} - \eta_i)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, & \\ \text{s.t. } \sum_{j=1}^m w_j &= 1, 0 \leq w_j \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

优化模型式(5)在计算专家个体评价与专家一致性评价之间的距离时,充分考虑了相应的指标权重,这是一种加权距离。模型式(6)将各个指标看作同等重要,指标取了相等的权重,从而模型式(6)成了优化模型式(5)的一种特例;显然,模型式(6)等价于模型式(1)。

1.3 基于专家权重的指标权重确定模型

当多个专家对指标的重要性进行语义评价并经表 1 转化为评价矩阵 $B = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \dots \quad \alpha_m]$ 之后,考虑到各个专家在决策过程中重要性不一,所以被评价对象的各个指标被群体认定的综合权重就是所有专家自身权重的加权聚合。对专家权重向量 w , 聚合结果 γ 为:

$$\gamma = \sum_{j=1}^m w_j \alpha_j = Bw \quad (7)$$

因为指标权重一般和为 1,故将 γ 标准化之后得到指标权重向量:

$$\bar{\omega} = [\bar{\omega}_1 \quad \bar{\omega}_2 \quad \dots \quad \bar{\omega}_n]^T = \frac{\gamma}{\|\gamma\|_1} \quad (8)$$

表 1 绿色性能评价体系中语义评价数值转换

Tab. 1 Numerical conversion of semantic evaluation in green performance evaluation system

| 语义评价 | 转化的数值 |
|------|-------|
| 应该删除 | 0 |
| 重要 | 1 |
| 一般重要 | 2 |
| 相对重要 | 3 |
| 非常重要 | 4 |

1.4 迭代模型

利用模型式(8)确定指标权重时需使用专家权重;同时,通过优化模型式(5)确定专家权重时 also 需使用指标权重,此处考虑将二者结合进行交替迭代确

定,迭代模型如下:

$$\begin{cases} \bar{\omega}^{(0)} = [1/n \quad 1/n \quad \dots \quad 1/n]^T, \\ w^{(k+1)} = \arg \min_w \sum_{j=1}^m \|\alpha_j - \eta\|_{A(\bar{\omega}^{(k)})}, \\ \bar{\omega}^{(k+1)} = Bw^{(k+1)} / \|Bw^{(k+1)}\|_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中,上标 0 和 $k+1$ 分别代表迭代第 0 步和第 $k+1$ 步的结果。图 2 体现了迭代模型式(9)的原理,通过带指标权重的优化模型确定专家权重,再通过已知的专家权重直接聚合指标评价结果从而确定指标权重,两者互相影响,最终可以输出收敛的指标权重以及对应的专家权重。

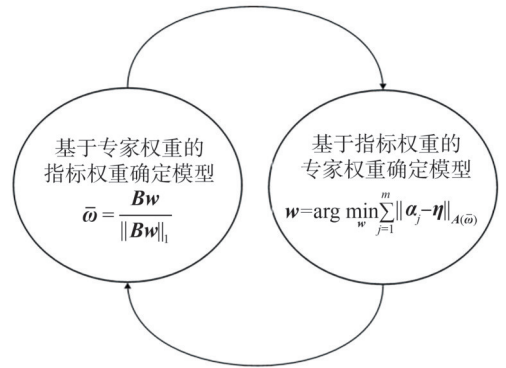


图 2 迭代模型的主要原理

Fig. 2 Core idea of the iterative model

为了对模型式(9)进行求解,需先对指标权重进行初始化,在指标权重未知的情况下采用了均分指标权重的方法,并且以模型相邻两次迭代得到的指标权重差的无穷范数达到极小来判断收敛情况。因此,可对模型进行迭代求解直至收敛,这样可以确定最终的专家权重和指标权重,其详细方法见算法 1,计算流程见图 3。

算法 1

输入: m 个专家对 n 个指标的语义评价。

输出: 专家权重 w 和指标权重 $\bar{\omega}$ 。

1. 将 m 个专家对 n 个指标的语义评价经表 1 转化为评价向量,第 i 个专家的评价向量记为 α_i 。

2. 设置迭代模型容差 ϵ 、最大迭代步数 s_m 。

3. 初始化指标权重 $\bar{\omega} = \left[\frac{1}{n} \quad \frac{1}{n} \quad \dots \quad \frac{1}{n} \right]^T$, 迭代步数 $s=0$ 。

4. 建立专家权重优化模型,并求解得到专家权重 w , 其中优化模型的初始专家权重为 $w =$

$$\left[\frac{1}{m} \quad \frac{1}{m} \quad \dots \quad \frac{1}{m} \right]^T。$$

5. 通过模型式(8)确定指标权重 $\bar{\omega}$ 。

6. 更新迭代步数 $s=s+1$, 如果模型相邻两次迭代得到的指标权重差的无穷范数 $\|\bar{\omega}_1 - \bar{\omega}_2\|_\infty$ 小于 ϵ 或迭

代步数大于 s_m , 则跳转到第 7 步, 否则返回第 4 步。

7. 输出迭代模型得到的最新专家权重 w 和指标权重 \bar{w} 。

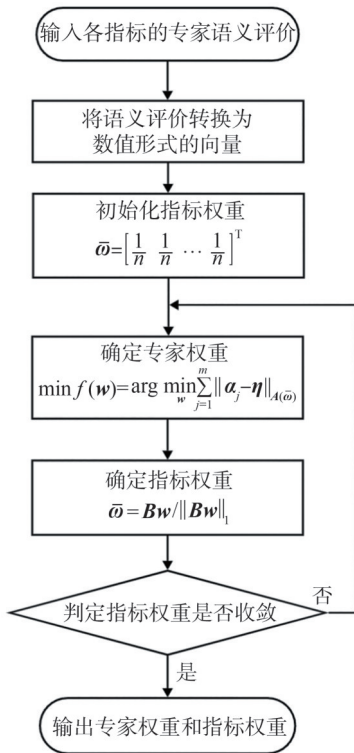


图 3 迭代模型流程图

Fig. 3 Flowchart of iterative model

2 应用案例

2.1 方案设计阶段的绿色性能评价体系

在方案设计阶段, 建立一个适当的绿色性能评价体系十分重要, 而现行的评价体系不能满足需求, 主要体现在以下方面。1) 场景适应性不足: 现行国家标准《绿色建筑评价标准》(GBT 50378—2019)^[26]、《民用建筑绿色性能计算标准》(JGJT 449—2018)^[27]等使用场景为施工图审查, 不适用于概念设计或调研策划工作。2) 阶段适应性不足: 相关标准及规范均涉及较深入的技术内容及参数, 需要结构、设备、幕墙、室内、景观等专业及专项配合, 图纸深度至少需要达到初步设计乃至施工图阶段才有可能进行真实、有效的分值评价, 因此不适用于概念设计或调研策划阶段。

本文采用绿色性能评价(CASBEE)体系, 因为其有以下优点。

1) 指标深度适配: CASBEE 相关指标定性打分或“是否”评价较多, 很多指标可以在方案初期通过模拟得出, 并通过 5 个等级区分出相应的 BEE 数值范围, 兼顾了简易性描述和科学性数值, 通过对方案及策划阶段进一步筛选后, 更适应于概念设计或策划活动。

2) 指标范围适配: 不仅重视降低环境负荷与减少

资源消耗, 而且关注空间舒适度及生活品质, 范围更为合理, 并便于单一方案评价或多方案比选。

3) 建筑类型适配: CASBEE 针对不同建筑类型设置了针对性指标体系, 有助于方案设计阶段结合建筑功能特征的整体评价。部分 CASBEE 指标体系如附录 A 表 A1 所示。

在实际操作中, 只需对最底层指标进行重要性评价即可获得每一级指标的权重。在 CASBEE 体系中, 由于指标众多, 需要根据不同类型建筑删除部分不重要的指标, 因此本文选择的语义评价及对应的转换数值如表 1 所示。如: 对于专家的语义评价为应该删除的指标, 将其转换为数值“0”, 即在计算权重时此情形下此指标权重为 0。

现根据此评价体系对办公建筑指标进行重要性评价, 共 9 位专家对 96 个底层指标进行了语义评价并经表 1 转化为向量。就案例数据进行对比, 讨论以下内容: 1) 算法 1 的收敛性; 2) 经迭代模型输出的指标权重与直接均分专家权重输出的指标权重差异; 3) 随机初始化迭代模型中的指标权重的模拟结果; 4) 在迭代模型中将专家权重与指标权重的初始化顺序更换后的模拟结果; 5) 不同类型建筑指标权重的结果差异。

数值实验结果表明, 随着迭代步数增加, 在无穷范数下迭代模型相邻两次解差的范数的对数值在降低, 如图 4 所示, 也就是说此迭代过程是收敛的。

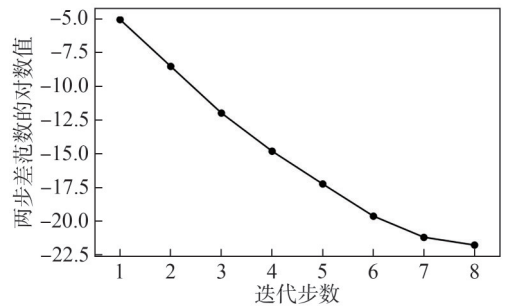


图 4 迭代步数与两步差范数对数值

Fig. 4 Logarithmic values of iteration steps and the norm of two-step deviations

取迭代 8 步的结果作为最终的办公建筑指标权重, 同时可输出专家权重为

$$w = [0.107\ 610\ 0.181\ 598\ 0.121\ 027\ 0.091\ 497\ 0.084\ 358\ 0.088\ 743\ 0.115\ 863\ 0.109\ 974\ 0.099\ 330]^T$$

附录 A 表 A2 列举了此专家权重下权重最小的前 10 个指标和权重最大的前 10 个指标。附录 A 表 A3 列举了在直接使用均分专家权重情况下, 通过模型式(8)确定指标权重时权重最小的前 10 个指标和权重最大的前 10 个指标。根据最终指标权重结果, 可以进行指标筛选以及对备选方案进行评价。

对比附录 A 表 A2、A3 发现:

1)不同专家权重下,权重最小的前9个指标和权重最大的前10个指标都是相同的,但是具体的指标权重值是不同的。

2)通过迭代算法确定的指标权重,权重值相同的指标较少,而在均分专家权重下,权重值相同的指标经常出现,不利于进行指标筛选。

通过以上对比,可知相比于直接使用均分专家权重按照式(8)确定指标权重,本文提出的迭代模型确定的指标权重更合理。

为了进一步判断迭代模型的收敛性,实验时随机初始化指标权重并迭代计算,然后将迭代结果与均分初始化指标权重的迭代结果进行比较,该过程重复100次。

图5展示了无穷范数意义下100次随机初始化指标权重的迭代结果 ω_1 与均分初始化指标权重迭代结果 ω_2 的差异 $\|\omega_1 - \omega_2\|_\infty$ 的分布。结果表明,每次随机初始化指标权重的迭代结果都会收敛到均分初始化指标权重的迭代结果。

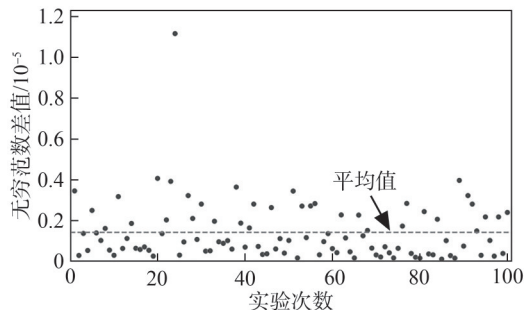


图5 无穷范数意义下的差值分布

Fig. 5 Distribution of deviations under the infinity norm

图5数据的统计情况表明,迭代模型在经过约8步的迭代后,迭代差值的范数最大值、最小值和平均值分别为 1.1×10^{-5} 、 5.2×10^{-8} 和 1.0×10^{-6} ,收敛误差基本都保持在 1.0×10^{-6} 水平。也就是说迭代模型的解与随机选取的初始指标权重无关,模型具有良好的收敛性。

本文还将迭代模型中“先初始化指标权重进行迭代”更改为“先初始化专家权重进行迭代”进行实验,其余条件均保持不变,发现迭代结果仍然是收敛的,如图6所示。

其最终输出的专家权重为

$$\omega = [0.107\ 610\ 0.181\ 598\ 0.121\ 027\ 0.091\ 497\ 0.084\ 358\ 0.088\ 743\ 0.115\ 863\ 0.109\ 974\ 0.099\ 330]^T$$

最终输出的指标权重也与附录A表A3相同,再次说明了本文提出的迭代模型具有良好的收敛性质。

9位专家根据评价体系(附录A表A1)对旅游建筑的指标进行重要性评价,并根据表1转化为向量。再次运用本文提出的迭代模型得到9位专家及96个底层指标的权重。此时最终输出的专家权重为

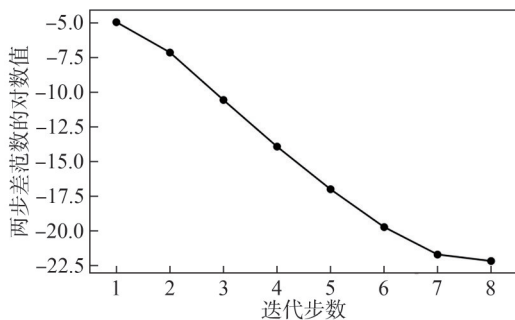


图6 初始化专家权重对应的迭代收敛过程

Fig. 6 Initialization of the iterative convergence process corresponding to expert weights

$$\omega = [0.110\ 073\ 0.075\ 089\ 0.089\ 305\ 0.104\ 258\ 0.082\ 817\ 0.094\ 170\ 0.123\ 813\ 0.136\ 805\ 0.183\ 671]^T$$

该结果与对办公建筑指标进行重要性评价时的专家权重存在差异,这说明了专家对不同类型的建筑的了解程度不同。最终输出的权重最小的前10个指标和权重最大的前10个指标如附录A表A4所示。对比附录A表A2、A4可以发现:权重最小的前10个指标中有6个指标都在两个表格中出现,说明这些指标在办公建筑与旅游建筑中重要性都相对较低;权重最大的前10个指标中只有3个指标都在两个表格中出现,办公建筑更加注重采光和噪声相关,旅游建筑更加注重使用者(游客)的感受,如休憩空间、无障碍规划等,这与两者的用途相符:办公建筑主要用于办公和行政管理,旅游建筑主要用于旅游和休闲娱乐。

2.2 建筑使用后评估评价体系

将公共建筑后评估成果反馈到建筑前策划环节中,产生设计优化迭代效益,是建筑前策划后评估设计闭环中的重要一步。依据中国建筑学会团体标准《公共建筑后评估标准》的初审稿,公共建筑后评估报告具有明确的指标体系,包含场地、建筑、专项三大类下属的69个二级指标,用于为公共建筑后评估打分,部分指标体系如附录A表A5所示。此指标是通用性指标,虽然在团体标准制定过程中已通过专家打分为指标设定权重,但未有针对不同建筑类型的差异化权重,故应用于某个具体建筑项目时会出现功能适用性不足的问题:同一指标对不同功能类型建筑的重要性有所差异,例如流线设计在交通建筑和教育建筑中重要性并不一致。若套用同一指标权重,可能引起评价误差。

选择的语义评价及对应的转换数值如表2所示,对于专家的语义评价,越重要的指标对应的数值越大。现根据此评价体系对博物馆建筑和体育馆建筑指标进行重要性评价,共5位专家对69个底层指标进行了语义评价,并经表2转化为向量。

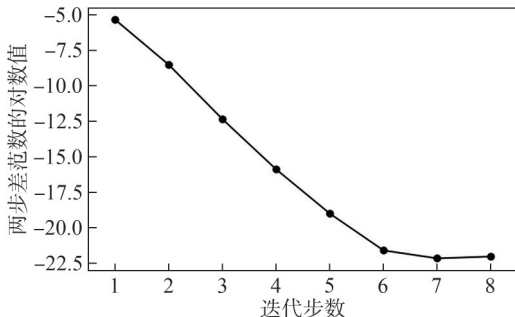
迭代过程的收敛情况如图7所示。可知,随迭代步

数增加,博物馆和体育馆建筑在无穷范数下迭代模型相邻两次解的差在降低,说明此迭代过程是收敛的。

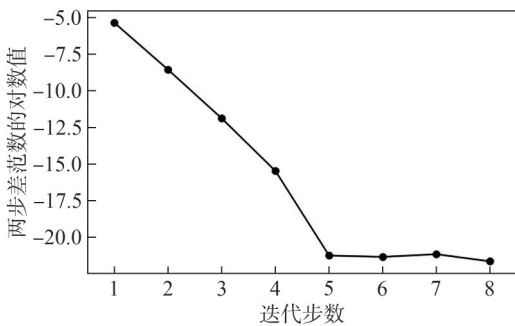
表 2 建筑使用后评估评价体系语义评价数值转换

Tab. 2 Numerical conversion of semantic evaluation in the post-occupancy evaluation system of architecture

| 语义评价 | 转化数值 |
|------|------|
| 重要 | 1 |
| 稍微重要 | 2 |
| 一般重要 | 3 |
| 相对重要 | 4 |
| 非常重要 | 5 |



(a) 博物馆



(b) 体育馆

图 7 博物馆和体育馆迭代过程的收敛情况

Fig. 7 Convergence of the iterative process for museums and gymnasiums

本文分别取迭代 7 步和 9 步的结果作为最终的指标权重,同时可输出博物馆建筑中专家权重为

$$w = [0.253\ 378\ 0.183\ 841\ 0.157\ 946\ 0.249\ 268\ 0.155\ 568]^T,$$

体育馆建筑中专家权重为

$$w = [0.236\ 133\ 0.167\ 887\ 0.166\ 570\ 0.255\ 092\ 0.174\ 317]^T.$$

虽然是同一批专家对博物馆建筑和体育馆建筑进行重要性评价,但由于对两类建筑的认识偏差,在不同场景下专家权重存在差异。

对于博物馆建筑,附录 A 表 A6 列出了权重值最大的 10 个和最小的 10 个指标及对应的权重值,并列出了体育馆对应指标的指标权重值及对应排序。对于体育馆建筑,附录 A 表 A7 列出了权重值最大的 10 个和最小的 10 个指标及对应的权重值,并列出了博物馆对应指

标的指标权重值及对应排序。博物馆和体育馆均为大型公共建筑,对比发现,它们在指标权重上存在相似之处,例如都强调在“A1-2-2 内部交通流线合理性”“A1-1-1 分区与布局合理性”和“B1-2-1 空间布局合理,满足功能、工艺需求”方面的重要性,对“A2-12 与场地相关的其他创新”等 5 个指标重视程度都相对较低,但也存在明显区别。

博物馆建筑和体育馆建筑的公共建筑后评估指标的权重存在差异,这说明专家认为同一指标对不同功能类型建筑的重要性不同,有必要依据功能类型赋予后评估指标差异化权重。由附录 A 表 A6 可知,博物馆权重最大的 10 个指标有 3 个同时是体育馆权重排名前 10 指标,差异明显。其中,博物馆排名第 4 重要的指标“A2-1 建筑布局体现历史文化、地域特色或前沿理念”对于体育馆排名第 57,体现出此指标对博物馆的功能类型重要性高,与博物馆的文化建筑属性紧密相关,而对于体育馆功能类型的运动功能相关性低,因而重要性低。博物馆权重最小的 10 个指标中有 5 个同时是体育馆权重后 10 指标。其中,博物馆排名第 66 重要的指标“C1-3-1 建筑和场地晚间照明满足光环境质量要求”对于体育馆排名第 34,体现出此指标对通常白天运营的博物馆的功能类型重要性较低,而对于夜间使用者较多、运动场地需要照明的体育馆功能类型重要性高。

3 结论

在建筑策划与后评估阶段的多指标群决策中,本文改进了 Liu 等^[25]提出的专家权重确定模型,且基于专家权重和指标权重的相互影响提出了一种收敛的迭代模型,这也是本文的重要创新点:

1)一方面,利用专家个人评价与专家群体评价一致性建立确定专家权重的优化模型,同时在计算一致性时考虑不同指标重要性的影响;另一方面,在已知专家权重时通过对指标评价向量直接聚合获得指标权重,两者结合构建了一种迭代模型可同时确定专家权重和指标权重。

2)通过实际案例探讨了迭代模型的收敛性,先是验证了在随机初始化时,模型具有收敛性;再通过更换迭代模型中专家权重和指标权重的确定顺序,即迭代中的初始化顺序,发现迭代模型仍然收敛且收敛到相同结果。

3)在实际案例中,比较了通过迭代模型输出的指标权重和通过均分专家权重聚合评价向量得到的指标权重,发现迭代模型输出的指标权重更加具有区分度;本文也比较了通过迭代模型输出的不同类型建筑

指标权重,指标权重间的差异符合建筑工程用途。

本文仅在案例中通过数值计算模拟展示了迭代模型的收敛性,并未从数学角度严格证明优化模型解的存在性和唯一性以及迭代模型的收敛性,对此将在后续研究中进一步探讨。

【致谢】感谢清华大学建筑设计研究院有限公司和中国建筑设计研究院有限公司的建筑师团队为本研究提供的核心实验数据支持。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献:

- [1] 庄惟敏. 建筑策划与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 庄惟敏,张维,梁思思. 建筑策划与后评估[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [3] Parshall S, Peña W. Problem seeking: An architectural programming primer[M]. 5th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.
- [4] Jin Shitao, Tu Huijun. Current status and research progress in architectural programming: A comparative analysis between China and other countries[J]. *Frontiers of Architectural Research*, 2025, 14(2): 487–509.
- [5] Lazar N, Chithra K. A comprehensive literature review on development of Building Sustainability Assessment Systems[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 32: 101450.
- [6] Momoh J, Ige O, Seidu R, et al. Urban sustainability assessment: An analysis of how weighting and aggregating coefficient system was used in the development of SUCCEED assessment tool for developing countries[J]. *Frontiers in Built Environment*, 2024, 10: 1413757.
- [7] Khan F, Pinter L. Scaling indicator and planning plane: An indicator and a visual tool for exploring the relationship between urban form, energy efficiency and carbon emissions[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 183–192.
- [8] Li Dengyue, Wang Jun, Shi Ke. Research on the investigation and value evaluation of historic building resources in Xi'an City[J]. *Buildings*, 2023, 13(9): 2244.
- [9] Zhuang Weimin, Miao Zhijian, Guo Song, et al. Research on the frontier trend of architectural programming and post-occupancy evaluation intelligent technology[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2023, 53(5): 704–712. [庄惟敏, 苗志坚, 郭淞, 等. 前策划后评估智能化技术的前沿趋势研究[J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(5): 704–712.]
- [10] Chen Jianquan, Zhuang Yi, Chen Shaoyong, et al. Post-evaluation model for 500 kV substation engineering projects using the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Heliyon*, 2025, 11(4): e42327.
- [11] Wang Meng, Niu Dongxiao. Research on project post-evaluation of wind power based on improved ANP and fuzzy comprehensive evaluation model of trapezoid subordinate function improved by interval number[J]. *Renewable Energy*, 2019, 132: 255–265.
- [12] Xu Z. On consistency of the weighted geometric mean complex judgement matrix in AHP[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 126(3): 683–687.
- [13] Li Xiangxin, Wang Kongsen, Liu Liwen, et al. Application of the entropy weight and TOPSIS method in safety evaluation of coal mines[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 2085–2091.
- [14] Song Huaxin, Lu Baiyi, Ye Chunhui, et al. Fraud vulnerability quantitative assessment of Wuchang rice industrial chain in China based on AHP–EWM and ANN methods[J]. *Food Research International*, 2021, 140: 109805.
- [15] Mao Jin, Yuan Hao, Xiong Lun, et al. Research review of green building rating system under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Buildings*, 2024, 14(5): 1257.
- [16] Zhao Pingping, Md Ali Z, Ahmad Y. Developing indicators for sustainable urban regeneration in historic urban areas: Delphi method and Analytic Hierarchy Process(AHP)[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 99: 104990.
- [17] Li Wenzhu, Meng Meng, Llewellyn C, et al. Developing an indicator framework for sustainability assessment in urban community regeneration: A case of Shanghai[J]. *Developments in the Built Environment*, 2024, 18: 100476.
- [18] Tu Huijun, Su Zongyi. A study on group decision makers of architectural programming of large complex projects[J]. *Architectural Journal*, 2016(12): 72–76. [涂慧君, 苏宗毅. 大型复杂项目建筑策划群决策的决策主体研究[J]. *建筑学报*, 2016(12): 72–76.]
- [19] Koksalmis E, Kabak Ö. Deriving decision makers' weights in group decision making: An overview of objective methods[J]. *Information Fusion*, 2019, 49: 146–160.
- [20] Herrera–Viedma E, Chiclana F, Herrera F, et al. Group decision-making model with incomplete fuzzy preference relations based on additive consistency[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2007, 37(1): 176–189.
- [21] Yue Chuan. Entropy-based weights on decision makers in group decision-making setting with hybrid preference representations[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 60: 737–749.
- [22] Dong Yucheng, Zhang Hengjie, Herrera–Viedma E. Integrating experts' weights generated dynamically into the consensus reaching process and its applications in managing non-cooperative behaviors[J]. *Decision Support Systems*, 2016, 84: 1–15.
- [23] Hu Qixiao, Liu Yuetong, Hu Chaolang, et al. Fuzzy multi-attribute group decision-making method based on weight optimization models[J]. *Symmetry*, 2025, 17(8): 1305.
- [24] Yue Zhongliang. Extension of TOPSIS to determine weight

of decision maker for group decision making problems with uncertain information[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(7): 6343–6350.

[25] Liu Yuetong, Hu Chaolang, Zhang Shiquan, et al. An optimization model with “perfect rationality” for expert weight determination in MAGDM[J]. *Mathematics*, 2025, 13(14):

2286.

[26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色建筑评价标准: GB/T 50378—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑绿色性能计算标准: JGJ/T 449—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

Iterative Group Decision-making-based Model for Indicator Weighting in Architectural Programming and Post-occupancy Evaluation

ZHUANG Weimin^{1,2}, JING Quan³, HU Chaolang^{4*}, LI Ruoxing², MIAO Zhijian², HU Qixiao⁴, LI Yanhao⁴

(1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Tsinghua University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100089, China;

3. China Architecture Design & Research Group Co., Ltd., Beijing 100044, China;

4. School of Mathematics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract:

Objective The determination of indicator weights in multi-criteria group decision-making (MCGDM) represents a critical issue in architectural programming and post-occupancy evaluation (POE). Traditional approaches often model expert weights and indicator weights independently, which leads to potential inconsistencies and suboptimal decision outcomes. This study aims to develop an iterative group decision-making model that simultaneously optimizes expert weights and indicator weights, enhancing the accuracy, reliability, and practical applicability of weight determination in complex engineering contexts.

Methods An iterative optimization model was proposed to integrate the determination of expert weights and indicator weights. First, an expert weight optimization model was established based on the consistency between individual expert evaluations and aggregated group evaluations. This model incorporated the relative importance of different indicators through a weighted distance metric derived from a specially defined A-norm, which generalized the standard Euclidean distance. Second, indicator weights were calculated by aggregating individual expert evaluations weighted by their corresponding credibility levels. Finally, an iterative framework was designed to enable mutual calibration between expert weights and indicator weights until convergence was achieved. The model was implemented algorithmically and validated using two real-world case studies, including green performance evaluation during architectural programming and building post-occupancy evaluation.

Results and Discussions Numerical experiments demonstrated that the proposed iterative model converged reliably under various initial conditions. In the green performance evaluation case, which involved nine experts and 96 indicators, the model converged within eight iterations, with differences between successive iterations falling below 10^{-10} in the infinity norm. The resulting expert weights exhibited significant variation, reflecting differences in expertise across building types, such as office buildings and tourism buildings. Similarly, in the POE case involving five experts and 69 indicators, the model converged within seven to nine iterations, and the resulting weights effectively captured functional differences between museum buildings and stadium buildings. Compared to baseline methods that assigned equal weights to experts, the proposed model generated more discriminative and contextually appropriate indicator weights. For example, in the office building case, the highest weighted indicators included room temperature, sunshade facilities, and noise control, whereas in the tourism building case, rest spaces and accessibility planning received higher weights, which were consistent with functional priorities. The model also demonstrated robustness to different initial conditions and maintained convergence regardless of the order of weight updates.

Conclusions This study presents a novel iterative group decision-making model that simultaneously determines expert and indicator weights by leveraging their mutual influence. The proposed model improves upon existing approaches by incorporating indicator importance into the calibration of expert weights, achieving more consistent and context-aware weight assignments. The convergence and practical applicability of the model are empirically validated through real-world case studies in architectural programming and POE. The method provides a mathematically rigorous and engineering-oriented approach to MCGDM, with potential applicability in other domains that involve multi-expert and multi-criteria evaluation processes.

Key words: architectural programming and POE; multi-criteria group decision-making; indicator weights; expert weights; iterative model

(编辑 陈雪)

引用格式: Zhuang Weimin, Jing Quan, Hu Chaolang, et al. Iterative group decision-making-based model for indicator weighting in architectural programming and post-occupancy evaluation[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2026, 58(2): 138–146. [庄惟敏, 景泉, 胡朝浪, 等. 建筑策划与后评估中基于群决策的指标权重迭代模型[J]. *工程科学与技术*, 2026, 58(2): 138–146.]