

文章编号:0254-0096(2018)02-0544-06

基于模糊层次分析法的光伏建筑综合效益评价

徐 伟, 宋亚丽

(内蒙古科技大学建筑与土木工程学院, 包头 014010)

摘 要: 基于太阳能光伏建筑的特点与评价指标体系的设置原则, 确定太阳能光伏建筑的评价指标体系, 构建基于模糊层次分析法的光伏建筑综合效益评价模型, 根据隶属度最大原则对包头市土默特右旗某中学 1993.68 kW_p 光伏应用示范项目进行综合效益评价, 得到该光电项目的经济效益评价等级为“优”, 隶属度为 0.5889; 技术效益和社会效益的评价等级为“良”, 隶属度分别为 0.7886 和 0.7046; 其综合效益评价等级为“优”, 隶属度为 0.3904。与实际应用结果相一致, 该模型具有一定的实践应用价值。

关键词: 太阳能光伏建筑; 模糊综合效益评价模型; 层次分析法; 评价指标体系

中图分类号: TU201.5; TU18

文献标识码: A

0 引 言

可再生能源中最具有发展潜力的太阳能得到广泛关注, 未来太阳能应用的主要方向是太阳能光伏建筑^[1]。影响光伏建筑建设的因素很多, Paudel 等^[2]在 2013 年提出了基于光伏发电项目投资、成本和收入的经济评价模型, 此模型适用于分析大型光伏发电项目的经济可行性; Armendariz-Lopez 等^[3]在 2016 年通过模拟安装在墨西哥下加利福尼亚州商业建筑上的太阳能光伏发电系统在不同方向和倾角上的发电量, 得到了安装多晶光伏组件最佳寿命周期成本的几何方向, 验证了在商业建筑上安装多晶硅光伏电池是可行的投资选择。文献[4~7]于 2013 年分别分析了光伏建筑的投资效益与财务评价, 运用技术经济评价方法或引入综合评价指标体系来评估光伏建筑的可行性。张 萍等^[8]详细阐述校园光伏建筑一体化的系统设计、部件分析以及假期光伏电力的并网设计, 论证了其可观的经济和环境效益。针对光伏建筑, 国内外对其综合效益评价模型的研究较少, 诸多实际工程应用未遵循科学规律, 未能客观、合理地评估建设光伏建筑的实际效益, 这不利于光伏产业的规模化发展。因而构建科学、系统的光伏建筑综合效益评价模型具有重要的

现实意义。

1 确定光伏建筑综合效益评价体系

1.1 项目综合效益评价体系遵循的原则

1) 科学性原则。项目评价选用的评价标准、评价方法、评价指标应科学、规范, 能较全面地反映出待评价对象的优劣程度。

2) 客观性原则。系统综合评价应根据一定的客观评价标准, 尽量用资料和数据说话, 而不能从主观出发来评估光伏建筑应用效果的好坏。客观也意味着公正, 坚持公平、公正的原则来制定评价标准, 平衡项目有关各方的利益。

3) 系统性原则。综合效益评价范围应涵盖待评价系统的主要方面和特点, 评价内容客观全面, 以确保评价结果的科学有效。

4) 可行性原则。项目综合评价体系应当简便、易行, 符合待评价系统的基本状况和基本特性。

5) 定性与定量相结合。除形式化系统之外, 评价系统必有模糊性、灰色性、粗糙性等不确定性, 需要对其进行定性分析。现代定性分析方法也需要运用数学工具进行计算, 同时, 定量分析需要建立在定性分析基础上, 所以将二者结合起来才能取得最佳效果。

收稿日期: 2016-01-07

通信作者: 徐 伟(1970—) 女, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事城市与房地产经济、建筑节能等方面的研究。btxuwei2006@126.com

1.2 综合效益评价体系的确定

本研究依据项目综合效益评价体系建立的原则,参考光伏产业有关规范、标准,在影响光伏建筑综合效益的内外部要素中筛选出较为灵敏、便于度量及内涵丰富的主要指标,同时借鉴已有研究成果

中的指标设置及类似系统的评价指标,结合项目所在地的实际情况和光伏建筑的特点以及影响光伏发电的因素,划分出经济效益、技术效益和社会环境效益3个分目标,并进一步将准则层6个指标细分为18个指标,确定光伏建筑综合效益评价体系,如图1所示。

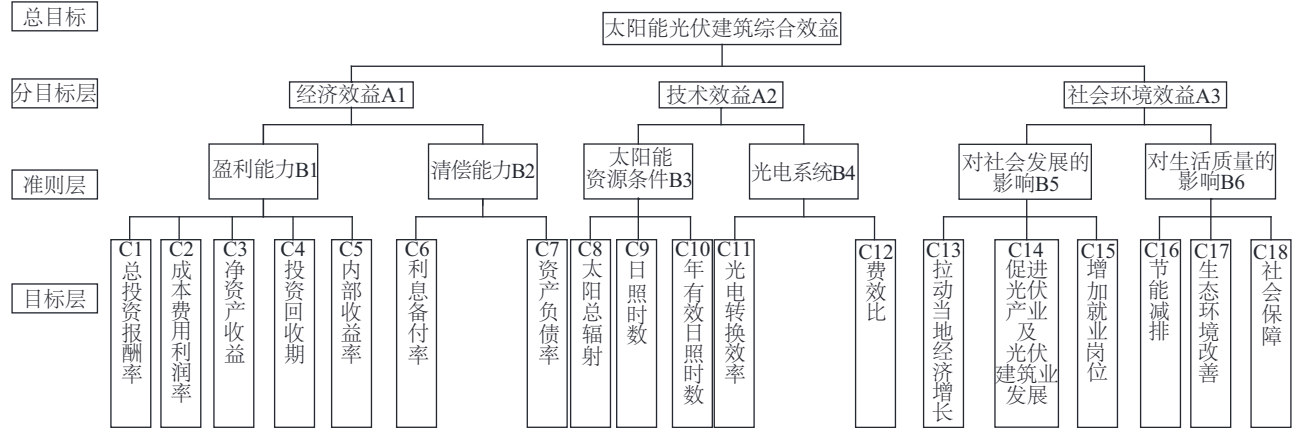


图1 光伏建筑综合效益评价体系

Fig. 1 The integrate benefits evaluation-index system of photovoltaic building

1.3 层次分析法确定权重

本研究通过层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[9, 10]对各指标赋予权重。首先采用1~9标度法(如表1所示),综合分析有关资料、专家意见给出判断矩阵中每一层次各个因素的相对重要性数值,其次运用方根法进行层次单排序,并进行一致性检验考察AHP计算结果的合理性:

$$R^c = \frac{I^c}{I^R} \quad (1)$$

式中, R^c ——随机一致性比例, $R^c < 0.10$, 说明计算结果具有满意的一致性; I^c ——判断矩阵的一致性指标, $I^c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ (其中 λ_{\max} 为最大特征根; n 为矩阵的阶数); I^R ——同阶随机一致性指标, 其取值表见2。

表1 重要性程度标度

Table 1 The degree of importance scale

含意	同等重要	稍微重要	明显重要	非常重要	极端重要
标度	1	3	5	7	9

注:2、4、6、8,表示2因素比较,介于上述相邻判断矩阵之间;倒数,表示因素 B_j 与因素 B_i 的比较结果(j, i 分别代表2个需要比较重要性的因素)

表2 随机一致性指标 I^R 的取值

Table 2 The values of the random consistency index

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I^R	0.00	0.58	0.11	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

最后,为了使评价结果更具有客观准确性,需对各评价指标进行层次总排序,即在层次单排序的基础上从上到下逐层计算每层元素对于上一层的重要性程度。假如上一层的层次总排序已经完成,元素 A_1, A_2, \dots, A_n 得到的权值分别为 a_1, a_2, \dots, a_n , 与 A_j 对应的本层次元素 B_1, B_2, \dots, B_m 层次单排序结果为 $(b_1, b_2, \dots, b_m)^T$ (当 B_i 与 A_j 无关联时, $b_i^j = 0$), 其重要性权值为 $W_i = \sum_{j=1}^n a_j b_i^j$ 。为评价判断矩阵的一致性,仍须根据(1)式进行层次总排序的一致性检验。其中,层次总排序的一致性指标如式(2):

$$I^c = \sum_{j=1}^n a_j I_j^c \quad (2)$$

式中, I_j^c ——与权值 a_j 对应的 B 层次中判断矩阵的一致性指标。

层次总排序的随机一致性指标如式(3):

$$I^R = \sum_{j=1}^n a_j I_j^R \quad (3)$$

式中, I_j^R 一与权重 a_j 对应的 B 层次中判断矩阵的随机一致性指标。

使用 Excel 表格进行评价指标权重和一致性检验的计算。计算结果为: $a=(0.6370 \ 0.2583 \ 0.1047)$, $R^c=0.0332<0.10$; 亚目标 $B_1 \sim B_6$ 对分目标 A 的权重为 $a_1=(0.7500 \ 0.2500)$, $a_2=(0.8333 \ 0.1667)$, $a_3=(0.7500 \ 0.2500)$, R^c 均为 $0<0.10$; 各指标对于亚目标的权重分别为 $b_1=(0.5079 \ 0.1518 \ 0.2218 \ 0.0400 \ 0.0785)$, $b_2=(0.8333 \ 0.1667)$, $b_3=(0.7172 \ 0.1947 \ 0.0811)$, $b_4=(0.8333 \ 0.1667)$, $b_5=(0.7306 \ 0.810 \ 0.1884)$, $b_6=(0.7286 \ 0.1088 \ 0.1626)$, R^c 分别为 0.0525 、 0 、 0.0810 、 0 、 0.0559 、 0.0739 , 均小于 0.10 , 判断矩阵具有较好的一致性。层次总排序确定的综合效益评价指标最终权重如表 3。

表 3 综合效益指标的最终权重

Table 3 The final weight of comprehensive benefit index

指标	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
权重	0.24	0.07	0.11	0.02	0.04	0.13	0.03	0.15	0.04
指标	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}
权重	0.02	0.04	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02

注: $I^c=0.0476$, $I^R=0.7206$, $R^c=0.0661<0.10$ 。

2 光伏建筑模糊综合效益评价模型

2.1 构建光伏建筑模糊综合效益评价模型

基于模糊层次分析法^[11]构建模糊综合效益评价模型(如图 2 所示)。1.3 节确定了各个层次指标权重, 该节根据项目特点以及各种数据的可获得性, 侧重于选择切合于待评价对象的隶属函数, 力求

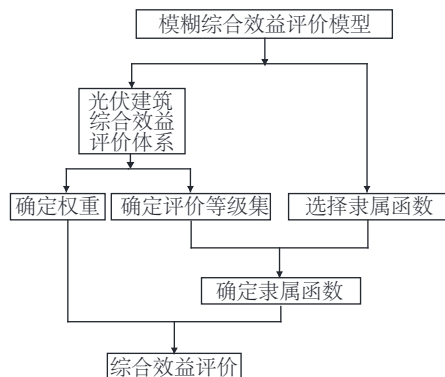


图 2 光伏建筑模糊综合效益评价模型

Fig. 2 The fuzzy comprehensive benefits assessment model of photovoltaic building

能够较全面准确地反映事物的本质, 为进行土默特右旗某中学 1993.68 kW_p 光伏应用示范项目的综合效益评价奠定基础。

每项评价指标一般不属于同一评语等级, 并且各评价指标隶属于评语等级的程度也不全一样, 为了得到评价指标的隶属度和简化计算, 对于定量指标, 选择梯形或降半梯形隶属度函数^[12-14]来计算其隶属度(各定量指标的具体隶属度函数略), 如式(4)所示:

$$u(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x < d \\ 0 & x > d \end{cases} \quad (4)$$

式中, $u(x)$ —— x 对 u 的隶属度。当 x 在 u 中变动时, $u(x)$ 就是一个函数; a 、 b 、 c 、 d 是隶属度函数的取值。

对于定性指标定量化, 用分级法划分 4 个等级, 即优(0.9)、良(0.7)、中(0.5)、差(0.2)^[15], 并按照相关标准请专家根据实际评价情况对明确定义的各个评价指标赋值, 其梯形隶属度函数如下:

$$V_I(x) = \begin{cases} 0 & x < 0.8 \\ 10x - 8 & 0.8 \leq x < 0.9 \\ 1 & x \geq 0.9 \end{cases} \quad (5)$$

$$V_{II}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.4 \\ 5x - 2 & 0.4 < x \leq 0.6 \\ 1 & 0.6 < x \leq 0.8 \\ 9 - 10x & 0.8 < x \leq 0.9 \\ 0 & x > 0.9 \end{cases} \quad (6)$$

$$V_{III}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0.2 \\ 10x - 2 & 0.2 < x \leq 0.3 \\ 1 & 0.3 < x \leq 0.4 \\ 3 - 5x & 0.4 < x \leq 0.6 \\ 0 & x > 0.6 \end{cases} \quad (7)$$

$$V_{IV}(x) = \begin{cases} 1 & x < 0.2 \\ 3 - 10x & 0.2 \leq x < 0.3 \\ 0 & x \geq 0.3 \end{cases} \quad (8)$$

2.2 光伏建筑综合效益评价等级划分

考虑到光伏建筑综合效益评价模型的可操作性, 在政策支持下光伏建筑的盈利性较强, 以及光伏行业的评价标准不完整, 本研究选择的评价等级论域(v)为:

$$v = \{\text{优 I, 良 II, 中 III, 差 IV}\}$$

项目评价实例是包头市土默特右旗某中学

1993.68 kW_p 光伏应用示范项目,其技术合作单位珠海兴业新能源科技有限公司是国家壹级施工、建筑设计甲级资质的专业工程企业,所以参照《企业绩效评价标准值 2015》中对中型电力生产企业的评价标准(如表 4)对项目进行评价,并赋予客观定量指标以具体数值。

表 4 中型电力生产企业定量指标评价标准

Table 4 The quantitative index evaluation criteria of medium-sized power enterprises

评价指标	优秀值	良好值	平均值	较低值
	优 I	良 II	中 III	差 IV
C ₁ 总资产报酬率/%	7.6	6.0	3.4	0.7
C ₂ 成本费用利润率/%	12.5	8.7	6.0	0.7
C ₃ 净资产收益率/%	10.5	7.9	5.5	0.9
C ₄ 投资回收期/a	7	10	12.5	15
C ₅ 内部收益率/%	7	8	10	12
C ₆ 利息备付率/%	3.6	2.0	0.7	-0.2
C ₇ 资产负债率/%	50	55	60	70

3 实例分析

3.1 项目概况

对位于包头市的土默特右旗某中学 1993.68 kW_p 光伏应用示范项目进行综合效益评价,包头市地理坐标为 109°50'E~111°25'E、41°20'N~42°40'N,太阳能年总辐射量在 1658.05~1675.14 kWh/m² 之间,有较充沛光资源、水资源,是蒙西地区经济发展中心和用电负荷中心。项目的静态投资为 2392.42 万¥,其中自有资金占 30%,总增量成本为 1592.42 万¥,其余为银行贷款。选用 195 W_p 的多晶硅电池组件 10224 块,总容量为 1993.68 kW_p,光电转换效率为 14.49%,逆变器的效率 98%,占用屋顶面积为 13057 m²,太阳能光伏系统并网运行,所产生的电能即发即用,按现有系统运行情况估算在 25 a 评价期内发电量约为 6858.33×10⁴ kWh。

3.2 分层模糊综合评价

由项目的基础数据以及运用式 4~式 8 计算得到定性和定量指标的模糊关系矩阵 $R_1 \sim R_6$,如表 5 所示,在 $R_1 \sim R_6$ 的基础上计算准则层的隶属度 R_A ,并根据式(9)进行第一层次的综合评价,再根据式(10)进行第二层次的综合评价。

$$B=(B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4 \ B_5 \ B_6)^T$$

$$=(b_1 \cdot b_1 \ b_2 \cdot R_2 \ b_3 \cdot R_3 \ b_4 \cdot R_4 \ b_5 \cdot R_5 \ b_6 \cdot R_6)^T \quad (9)$$

$$A=(a \cdot R_A)$$

$$=(0.3904 \ 0.3295 \ 0.2539 \ 0.0191) \quad (10)$$

表 5 各评价指标的隶属度与基础数据

Table 5 The basic data and membership of each evaluation index

指标层	基础数据	计算数据	综合效益评价等级划分			
			优 I	良 II	中 III	差 IV
C ₁ 总资产报酬率	22.36	22.36	0	0	0	1
C ₂ 成本费用利润率	4.47	4.47	0	0.16	0.84	0
C ₃ 净资产收益率	18.14	18.14	1	0	0	0
C ₄ 投资回收期	9	9	0	0	1	0
C ₅ 内部收益率	10.67	10.67	0	0	1	0
C ₆ 利息备付率	1.81	1.81	0	0.31	0.69	0
C ₇ 资产负债率	44.57	44.57	1	0	0	0
C ₈ 太阳总辐射	6081	6081	0	1	0	0
C ₉ 日照时间	2882	2882	0	0.46	0.55	0
C ₁₀ 年有效日照时间	1800	1800	0	1	0	0
C ₁₁ 光电转换率	11.6	11.6	0	0.3	0.7	0
C ₁₂ 费效比	0.35	0.35	0	0	0	1
C ₁₃ 带动当地经济发展	—	0.64	0	0	1	0
C ₁₄ 促进光伏产业及建筑业发展	—	0.53	0	0.65	0.35	0
C ₁₅ 增加就业岗位	—	0.47	0	0.35	0.65	0
C ₁₆ 节能减排	—	0.88	0.8	0.2	0	0
C ₁₇ 生态环境改善	—	0.72	0	1	0	0
C ₁₈ 社会保障	—	0.42	0	0.1	0.9	0

由式(5)得到第一层次的综合评价:

$$B=\begin{pmatrix} 0.7297 & 0.0239 & 0.2065 & 0.0400 \\ 0.1667 & 0.2583 & 0.5750 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.8939 & 0.1061 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.2500 & 0.5833 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.8492 & 0.1508 & 0.0000 \\ 0.5829 & 0.2708 & 0.1463 & 0.0000 \end{pmatrix}$$

同理,

$$R_A=\begin{pmatrix} 0.5889 & 0.0825 & 0.2986 & 0.0300 \\ 0.0000 & 0.7866 & 0.1856 & 0.0000 \\ 0.1457 & 0.7046 & 0.1497 & 0.0000 \end{pmatrix}$$

由式(6)得到第二层次的综合评价:

$$A = (0.3904 \quad 0.3295 \quad 0.2539 \quad 0.0191)$$

通过多级模糊综合评价得到该光伏建筑在分级模糊综合效益评价中隶属于“优”的程度为 0.3904,“良”的程度为 0.3295,“中”的程度为 0.2539,“差”的程度为 0.0191,根据最大隶属度原则,其综合效益评价等级为 I 级优,有较好的综合效益,可以建设实施。

4 结 论

本研究遵循科学性、层次性、可计算性以及可操作性等原则,从原始数据或评价信息中选出较为灵活、适于度量以及尽可能涵盖待评价系统主要方面和特点的指标,确定了光伏建筑综合效益评价体系。以此为基础,基于模糊层次分析法建立客观、科学的模糊综合效益评价模型,并对包头市土默特右旗某中学 1993.68 kW_p 光伏应用示范项目进行综合效益的评价,评价结果为该光伏建筑具有很好的综合效益,这与实际应用结果一致,论证了模型的科学性和实用性,能为评价光伏建筑综合效益提供一定的依据。

在对光伏建筑综合效益评价的研究中,确定科学可行的综合效益评价指标体系是进行综合效益评价的重要前提;由于不同地区、不同项目都有自己的特点,在选择评价指标时需要根据实际情况和经验进行必要调整;对所构建模型应进行充分的实际工程检验,逐步增强其科学性、完备性和可操作性。所以,本研究对光伏建筑得综合效益评价有一定的实践应用意义。

[参考文献]

- [1] 杨金焕. 太阳能光伏发电应用技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013, 1—7.
- [1] Yang Jinhuan. Application technology of solar PV generation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013, 1—7.
- [2] Paudel A M, Sarper H. Economic analysis of a grid-connected commercial photovoltaic system at Colorado State University—Pueblo[J]. Energy, 2013, 52 : 289—296.
- [3] Armendariz-Lopez J F, Luna-Leon A, Gonzalez-Trevizo M E, et al. Life cycle cost of photovoltaic technologies in commercial buildings in Baja California, Mexico [J]. Renewable Energy, 2016, 87(1): 564—571.
- [4] 顾文石. 安白景观带光伏发电项目技术经济分析及综合评价[D]. 保定: 华北电力大学, 2013.
- [4] Gu Wenshi. Technical and economic analysis and comprehensive assessment of photovoltaic power generation projects in Anbai Jingguandai [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2013.
- [5] 丁可望. DT公司太阳能光伏发电项目效益研究[D], 兰州: 兰州大学, 2013.
- [5] Ding Kewang. Study on solar photovoltaic power project benefits of DT company [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.
- [6] 李 芬, 陈正洪, 蔡 涛, 等. 并网光伏系统性能精细化评估方法研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(6): 974—983.
- [6] Li Fen, Chen Zhenghong, Cai Tao, et al. Refinement assessment method of grid-connected PV system preformance[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34 (6): 974—983.
- [7] 刘 静. DX光伏发电项目投资效益分析[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [7] Liu Jing. DX Photovoltaic. power generation project investment benefit analysis [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [8] 张 萍, 张大鹏, 桑培东. 校园光伏建筑一体化应用研究——以山东建筑大学 1 MW_p 太阳能光伏并网发电示范项目为例[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41 (4): 137—141.
- [8] Zhang Ping, Zhang Dapeng, Sang Peidong. Campus building integrated photovoltaic application research—Taking Shandong Jianzhu University 1MW_p solar-photovoltaic power generation demonstration projects as an example [J]. Sichuan Building Science, 2015, 41 (4): 137—141.
- [9] 王新华, 李堂军, 丁黎黎. 复杂大系统评价理论与技术[M]. 济南: 山东大学出版社, 2010: 70—84.
- [9] Wang Xinhua, Li Tangjun, Ding Lili. A complex large system evaluation theory and technology [M]. Ji'nan: Shandong University Press, 2010: 70—84.
- [10] 陈黎黎, 金腊华. 湖库富营养化的改进型模糊综合评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34 (12): 3223—3229.
- [10] Chen Lili, Jin Lahua. An improved fuzzy comprehensive evaluation method of eutrophication for lakes and reservoirs [J]. China Environmental Science, 2014, 34 (12): 3223—3229.
- [11] 袁尚南, 强茂山, 温 祺, 等. 基于模糊层次分析法

- 的建设项目组织效能评价模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(6): 616—623.
- [11] Yuan Shangnan, Qiang Maoshan, Wen Qi, et al. Organizational effectiveness evaluation model for construction projects based on fuzzy-analytic hierarchy processes[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Technol, 2015, 55(6): 616—623.
- [12] 贺仲雄. 模糊数学及其应用[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1985, 67—72.
- [12] He Zhongxiong. Fuzzy sets and applications[M]. Tianjin: Tianjin science and technology publishing house, 1985, 67—72.
- [13] 常大勇, 张丽丽. 经济管理中的模糊数学方法[M]. 北京: 北京经济学院出版社, 1995, 100—105.
- [13] Chang Dayong, Zhang Lili. The fuzzy mathematics method in economic management[M]. Beijing: Beijing Institute of Economic Publishing House, 1995, 100—105.
- [14] 李安贵, 张志宏, 孟 艳, 等. 模糊数学及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006, 135—142.
- [14] Li Angui, Zhang Zhihong, Meng Yan, et al. Fuzzy sets and applications[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006, 135—142.
- [15] 潘 朝, 吴 立, 左清军, 等. 基于模糊数学的武汉市地下空间开发地质适宜性评价[J]. 安全与环境工程, 2013, 20(2): 19—23.
- [15] Pan Zhao, Wu Li, Zuo Qingjun, et al. Geological suitability evaluation of the development of underground space in Wuhan city based on fuzzy mathematics[J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20(2): 19—23.

COMPREHENSIVE BENEFITS EVALUATION FOR PV BUILDING BASED ON FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS

Xu Wei, Song Yali

(Architecture and Civil Engineering School, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Combining with the characteristics of the solar PV building and the setting principle of evaluation index system, the evaluation index system of the solar PV building was determined and then the comprehensive benefits evaluation model of the PV building was constructed based on fuzzy analytic hierarchy process. Then the comprehensive benefits of 1993.68 kW_p PV application demonstration project of a middle school in Baotou city Tumd Right Banner was evaluated based on maximum subordination principle. The membership of its economic benefits is 0.5889, thus the project economic evaluation grade is excellent; The evaluation of technical and social benefits rank good with membership of 0.7886 and 0.7046, respectively; the membership of the comprehensive benefit is 0.3904, excellent, which is well in accordance with the practical application results. Therefore this model has a certain practical application value.

Keywords: solar PV building; fuzzy comprehensive benefits assessment model; analytical hierarchy process; evaluation index system