

Potovoltaic Technology Industrialization Potential Evaluation Based on Fuzzy Consistent Matrix

Weimin Sun^{1,2}, Jinsheng Shen¹, Zhenquan Wang²

School of Traffic & Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

College of Economics and Management, Beijing Institute of Petrol-chemical Technology, Beijing, China

1. sunweimin@bipt.edu.cn, 3. wangzhenquan@bipt.edu.cn

Abstract: This paper builds the Fuzzy Consistent Matrix as well as the assessment index to remedy the defect in Analytic Hierarchy Process consistency test, and to resolve the difficulty in building Fuzzy Synthetic Judgment subordinate function. In addition, the industrialization potential of potovoltaic technology is evaluated in this paper. The results suggest that the technology of film solar cell, like amorphous-silicon (a-Si) thin film solar cell and polycrystalline silicon (poly-Si) thin film cell, has more industrialization potentiality than the traditional technology, like monocrystalline silicon solar cell and polycrystalline silicon. The Fuzzy Consistent Matrix model proves available and effective as well.

Keywords: Potovoltaic technology; industrialization; potential; fuzzy consistent matrix

基于模糊一致矩阵的光伏发电技术产业化潜力评价

孙卫民^{1,2}, 申金升¹, 王振全²

1. 北京交通大学交通运输学院, 北京, 中国, 100044

2. 北京石油化工学院经济管理学院, 北京, 中国, 102617

1. sunweimin@bipt.edu.cn, 3. wangzhenquan@bipt.edu.cn

摘要: 为解决层次分析法一致性检验时存在的缺陷和模糊综合评判方法隶属函数建立困难的问题, 构建了模糊一致性矩阵评价模型和评价指标体系, 并对太阳能光伏发电技术产业化潜力进行了评价。结果表明, 薄膜太阳能电池技术如非晶硅薄膜电池技术和多晶硅薄膜电池技术较传统的单晶硅、多晶硅太阳能电池技术具有明显的产业化潜力, 同时也说明该模糊一致矩阵模型具有实用性和有效性。

关键词: 光伏技术; 产业化; 潜力; 模糊一致矩阵

1 引言

从钻木取火到核聚变能利用, 人类文明的进程可以归结为能源利用技术的进步。当今世界的能源利用技术决定了资源禀赋主导的以化石能源为主的能源消费结构, 并给人类社会可持续发展带来以下两方面的重大挑战。一是化石能源资源的有限性, 二是温室气体排放对大气的影响导致全球气候变暖。化石能源是过去亿万年来太阳能在地球上的碳(化合物)能源储备, 也就是说, 除了核能之外, 人类能源利用的终极来源是太阳。所以, 太阳能的直接利用是目前人类解决社会经济持续发展问题的可行方案之一。水力、风力和潮汐能、生物质能等作为地球上太阳能的表现形

式, 由于其局限性不能满足人类消费的需要, 所以太阳能的直接利用将会在将人类社会能源消费结构中占有很重要的地位。

目前技术上成熟的太阳能发电有光热发电技术和光电技术两大类。前者用太阳光生产水蒸气发电, 其应用受到地质条件和规模的限制, 除了热源之外, 与传统的发电技术没有区别。后者利用光电技术直接将太阳能转变成电力, 不受地质条件和规模的限制, 是目前太阳能应用的推广技术。电力必须具备一定的电压, 所以将太阳能直接转变成电力的技术也叫做“光伏发电技术”(Potovoltaic Technology, 简称PV技术)。一项技术的推广应用并被市场所接受的前提是在市场经济条件下的产业化, 其中包括技术和经济上的可行性。

资助项目: 能效管理评价与创新研究团队 (PHR201007136)

PV技术产业化评价是一个缺乏经验数据的多目标问题,其实实施具有一定的难度。首先,由于光伏转换的原理和技术种类繁多,例如从胡萝卜素产生微弱的光电信号到单晶硅19.5%的光电转化率等,其光电转换技术指标和经济性(建造维护成本)各不相同,加上材料的清洁型和运行的稳定性等因素,因此PV技术产业化的评价是一个多因素、多目标问题。其次,PV技术还处于成长阶段,目前只有少数几个技术有一定规模生产,大规模产业化的技术经济指标尚缺乏实践经验。第三,PV技术专业性强,目前同时熟悉技术和经济分析的专家稀少。所以,如何选择具有产业化潜力的光电技术,既是政府和企业面临的重大抉择难题,也是学术界所面临的综合评价问题。本文结合近年在我国太阳能资源等方面的研究基础上,对我国PV技术的产业化潜力进行评价。

光伏发电技术的基本原理是将太阳光辐射能直接转换为电能,目前有应用前景的是半导体材料技术。光伏发电是集半导体材料、电力电子、现代控制、蓄电池及电力工程等技术于一体的综合性系统,其核心是太阳能电池技术。所以本文仅限于讨论对太阳能电池技术产业化潜力问题。

太阳能电池是PV发电系统最主要的核心组件,在不引起混淆的前提下本文将太阳能电池技术简称PV技术。从发展和应用角度来看PV技术是一种新兴技术,即“基于科学的,有可能创立一个新行业或者改造一个现有行业的创新”^[1],或者说,新近出现或正在发展的、具有较大发展潜力的、对经济结构或行业发展产生重要影响的高技术^[2,3]。所以,PV技术的产业化潜力评价应落实在新兴技术潜力评价的范畴内研究。

目前针对新兴技术评价具有代表性的组织有:欧盟未来技术联合研究中心^[4]、美国国家再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory,简称NREL)^[5]。1999年欧盟未来技术联合研究中心设计开发了一套评估新技术市场潜力的系统(IPTS-TIM)。针对技术和市场,该系统设计了技术成熟度、市场潜力、创新潜力和社会与经济战略重要性四个评价准则,而新兴技术的商业化和技术转移带来的可能经济前景则通过经济及财务评估模型来分析。美国国家再生能源实验室开发的“太阳能顾问模型SAM(Solar Advisor Model)”是直接针对PV技术的评价,它提供了一种统一的框架,从不同技术产生的经济效益来分析和评价

整个太阳能市场中采用的新兴技术。由此来看,它们的评价指标主要是基于技术和市场两个方面来构建的,其中,新兴技术的经济性是其评价的核心点,没有考虑环境及政策一致性的影响因素,不具系统性。

国内许多学者针对技术产业化指标体系的构建进行了研究,文献[6]对专利技术产业化选择时采用了技术因素、经济因素、市场因素和社会因素;文献[7]对电动技术产业化水平进行了研究,选用产业规模化水平、产业集约化水平、经营效益化水平、产业工业化基础水平作为其指标体系;有些学者对显著影响技术产业化效果因素进行了深入研究,从技术优势、技术知晓性、工艺成熟度、技术可替代性、企业对产品竞争优势的准确识别、企业采取的战略联盟策略、试销成功的角度对技术产业化效果进行评价;文献[8]对新兴技术产业化潜力评价与选择进行了研究,该研究建立的指标体系如果针对太阳能PV技术虽具有参考价值,但显得宽泛。

综上所述,迄今为止对PV技术的评价仅限于技术层面研究,还没有系统地研究PV技术产业化潜力评价的文献。本文研究工作试图填补PV技术产业化潜力评价的空白。

2 评价模型与方法

2.1 模糊一致矩阵

PV技术产业化潜力评价是一个多目标、多层次和多属性的复杂决策问题。首先,具体的可选方案有很多,如单晶硅技术、多晶硅技术、太阳能薄膜技术等。其次,评价对象涉及诸多层面,需要考虑技术、市场、环境、经济性、产业基础,以及与政策一致性等多个层面的问题等。而每个层面的问题中包含了诸多指标或因素,例如技术层面有转换效率、清洁性、稳定性,以及工艺的复杂性和材料的稀缺性等诸多因素。再次,评价指标中定性的内容较多,定性指标受评价者个人知识、能力、偏好等因素影响,很难排除人为因素所带来的偏差,使评价者的结论具有模糊性。

层次分析法(Analytic Hierarchy Process,简称AHP)是解决多层次、多属性的多目标决策问题的有效评价方法之一,但在检验判断矩阵是否具有 consistency 方面存在缺陷^[9]。基于PV技术产业化潜力评价的上述特性,我们采用模糊一致矩阵方法,它兼具解决定性事件专家评分的模糊性和保证判断矩阵的一致等特殊性质。为便于阅读,以下简要介绍其基本原理,需要进一步

了解的读者请参阅文献^[9-10]。

对于多目标或多因素决策问题 $\varphi = \{A, C\}$ ，其中 A 是备选方案集合， C 是评价因素或指标集合，其中的因素或指标可以是定量指标，也可以是定性指标。有许多方法可以解决该决策问题，其中模糊一致矩阵方法可以将多因素(或多个分系统)的决策结果，即多个模糊一致矩阵有效地综合起来，从而形成模型一致的综合决策矩阵。这是建立多层次、多因素决策方案优选方法的理论基础。

考虑 A 由 N 个备选方案， C 由 M 个因素或指标，即 $A = \{A_i : i = 1, \dots, N\}$ ， $C = \{C_i : i = 1, \dots, M\}$ 构成的多因素或多目标决策问题。如果能将 C 按属性分解为若干类，并且其属性具有分层次的树型结构，其“树根”是问题的总目标， C 构成属性结构的“末端枝”。或者反过来讲，问题的总目标可以分解成相互独立的分目标或分准则，且各个分目标又可以分解成相互独立的分枝准则。于是得到具有 L 层结构的决策树： $\square = \{\square_l : l = 0, 1, \dots, L-1\}$ ，其中 $\square_l = \{C_i^l : i = 1, \dots, m_l\}$ 由 m_l 个元素组成，即 $C_l \square \cup_{i=1}^{m_l} C_i^l = \{C_i^l : i = 1, \dots, m_l\}$ ，且 $C_i^l \cap C_j^l = \emptyset (i \neq j)$ 。 C_i^l 是具有上层元素 C_i^{l-1} 属性的分支集合，称 \square_{l-1} 是 \square_l 的上层指标。显然， $\square_0 = \{C^0\}$ 是决策问题的总目标， $\square_{L-1} = \{C_i^{L-1} : i = 1, \dots, m_{L-1}\}$ 由评价指标集 $C = \{C_i : i = 1, \dots, M\}$ 构成，并且从每一个指标 $C_i (i = 1, \dots, M)$ 到总目标 C^0 存在唯一的路径。

进一步将备选方案 A 依据 \square_{L-1} 的各个元素分解为 $A = \cup_{i=1}^{m_{L-1}} C_i^L$ ，得到 $\square_L = \{C_i^L : i = 1, \dots, M\}$ 。由于通常需要将备选方案 A 针对 C 的每一个元素进行比较打分，所以事实上 $C_i^L = A (i = 1, \dots, M)$ 。将 \square_L 添加到 \square 中得到扩充的决策问题 $\bar{\square} = \{\square_l : l = 0, 1, \dots, L\}$ ，其中 $\square_0 = \{C^0\}$ 是总目标， \square_L 是由 N 个备选方案生成的。

假设第 l 层同一组中的每一对因素相对于其上一层的指标，例如 $C_i^{l-1} (m_{l-1} \geq i \geq 1)$ ，能够相互比较优劣次序，而且 A 中的每一对备选方案相对于最底层(第 $L-1$ 层)的具体指标能比较优劣次序，则 AHP 的基本思想是：在补充第 L 层因素，即 $C_L = A$ 的基础上，采用一定的技术将每一层因素的上述比较优劣次序转换为在本层本组中的相对优劣次序，用赋权表示为 $(C_l, w_l) = \{(C_i^l, w_i^l) : i = 1, \dots, m_l\}$ ，其中 $\sum_{i=1}^{m_l} w_i^l = 1$ ， $C_i^l \cap C_j^l = \emptyset (i \neq j, l = 1, \dots, L-1)$ 。依次逐层向上，即可求得备选方案相对于总目标的相对优劣次序。

然而，AHP 在构建判断矩阵、确定权重的计算方

法中遇到的致命弱点是不能保证判断矩阵具有一致性。另一方面，采用“专家打分法”构建的判断矩阵，无论采用哪种分级制，专家做出的打分都是根据其专业知识和个人偏好做出的模糊判断。所以 AHP 的本质是建立在模糊判断基础之上的。下面介绍的“模糊一致矩阵”方法能解决 AHP 未能解决的问题。

为便于叙述做以下定义，其中省略了上下标。如果在因素 C 下专家主观认为 A 优于 B ，则记为 $A \succ B|_C$ ；认为等价或没有明显区别则记为 $A \square B|_C$ 。设因素 C 有 n 个下层关联元素，则专家打分的三级模糊判断矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 定义为：

$$b_{ij} = \begin{cases} 0 & , A_j \succ A_i |_C \\ 0.5 & , A_i \square A_j |_C (i, j = 1, \dots, n) \\ 1 & , A_i \succ A_j |_C \end{cases} \quad (1)$$

在 AHP 中通常以 $r_i = \sum_{j=1}^n b_{ij}$ ，或其规范化系数作为元素 A_i 的相对权重。这里，由于 b_{ij} 不具备一致性而导致权重的不适应性。为了构造具有一致性的判断矩阵，作变换：

$$\begin{cases} r_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \\ r_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \end{cases} \quad (2)$$

由于 $b_{ii} = 0.5 (i = 1, \dots, n)$ ，则 $n - 0.5 \geq r_i \geq 0.5$ ， $1 - \frac{1}{2n} \geq r_{ij} \geq \frac{1}{2n} > 0$ ， $r_{ii} = 0.5$ ，且

$$r_{ik} - r_{jk} + 0.5 = \frac{r_i - r_k}{2n} + 0.5 - (\frac{r_j - r_k}{2n} + 0.5) + 0.5 = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 = r_{ij}$$

从而得到具有一致性的判断矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。

2.2 方案评价

设已构造了由 N 个决策方案和 M 个因素决策问题 $\varphi = \{A, C\}$ 构成的层次结构 $\bar{\square} = \{\square_l : l = 0, 1, \dots, L\}$ ，则基于模糊一致矩阵的多因素决策方案优选过程归结为各个层次权重的构造。

设 $\square_l (l = 1, \dots, L)$ 中的第 k 类因素集 C_k^l 有 n 个元素，并假设通过专家打分得到满足(1)式的判断矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 和由(2)式确定的模糊一致矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times n}$ 。这里为简便起见，省略标号 k 和 l 。令

$$\begin{cases} s_i = (\prod_{j=1}^n r_{ij})^{\frac{1}{n}} \\ \omega_i = \frac{s_i}{s} \end{cases} \quad (i = 1, \dots, n) \quad (3)$$

其中 $s = \sum_{j=1}^n s_j$ 。于是我们得到因素集 C_i^l 的权重，并依此可以求出层次结构 $\square_l \in \tilde{\square}, (l=1, \dots, L)$ 中每一个元素相对于其上层因素的权重。

注意到层次结构 $\square = \{\square_l : l=0, 1, \dots, L-1\}$ 中的每一层满足 $C_i^l \cap C_j^l = \emptyset, (i \neq j)$ ，且从每一个指标 C_i^l 到总目标存在唯一的路径，记为 P_i^l 。设 P_i^l 上的第 l 层元素 $C_i^l \in C_i^l \cap P_i^l$ 的相对权重为 ω_i^l ，则 C_i^l 相对于总目标 C^0 的综合权重为：

$$\omega(C_i^l) = \prod_{i=1}^{L-1} \omega_i^l, \quad (i=1, \dots, M) \quad (4)$$

备选方案 A_i 相对于总目标的评价值为：

$$h(A_i) = \sum_{j=1}^M \omega_j^l \omega(C_j^l) = \sum_{j=1}^M (\omega_i^l \prod_{k=1}^{L-1} \omega_j^k), \quad (i=1, \dots, N) \quad (5)$$

事实上，由于 $\square_{L-1} = \{C_k^{L-1}; k=1, \dots, m_{L-2}\}$ ，且 $C = \cup_{k=1}^m C_k^{L-1} = \{C_i : i=1, \dots, M\}$ ，其中， $C_k^{L-1} = \{C_j^k : j=1, \dots, n_k\}$ ，于是 $\sum_{i=1}^M \omega(C_i) = \sum_{k=1}^{m_{L-2}} \sum_{j=1}^{n_k} \omega(C_j^k)$ 。注意到 C_k^{L-1} 对应相同的上层因素，且 $\sum_{j=1}^{n_k} \omega_j^k = 1$ ，故

$$\sum_{j=1}^{n_k} \omega(C_j^k) = \prod_{l=1}^{L-2} \omega_k^l \sum_{j=1}^{n_k} \omega_j^k = \prod_{l=1}^{L-2} \omega_k^l,$$

其中 $\prod_{l=1}^{L-2} \omega_k^l$ 是 \square_{L-2} 中第 k 个元素相对于总目标的综合权重，类似于(4)式，记为 $\omega(C_k^{L-2})$ 。依此类推，有

$$\sum_{i=1}^M \omega(C_i) = \sum_{k=1}^{m_{L-2}} \omega(C_k^{L-2}) = \sum_{k=1}^{m_1} \omega(C_k^1) = \sum_{k=1}^{m_1} \omega_k^1 = 1。$$

3 PV 技术产业化潜力评价

3.1 评价指标体系的构建及其权重

评价的核心问题，是确定评价指标体系。指标体系是否科学、合理，直接关系到评价的质量。为此，评价指标体系必须科学地、客观地、合理地、尽可能全面地反映影响PV技术产业化潜力的所有因素。因此构建指标体系时首先必须遵守的基本原则有：(1)代表性原则。所选用的单个指标或整个指标体系均能代表PV技术产业化潜力。(2)可比性原则。所选取的指标能针对不同的PV技术具有较好的可比性基础。(3)可行性原则。选取的评价应考虑统计工作的可操作性。无法通过统计方法得到PV技术产业化潜力相关值的指标虽具有代表性也是不可行的。(4)独立性原则。要求指标之间的关联性较小。其次，由于太阳能PV技术作为新型“清洁能源”技术具自身特点，如PV系统在运行时被认为是零碳排放和零能耗，但在其产业链前端，

如单晶硅、多晶硅的生产会有大量的能耗和碳排放。所以在构建指标体系时，必须从全寿命周期的宏观视角，融入未来社会发展以低碳经济为主导的思想。

影响 PV 技术产业化潜力的因素很多，从宏观的角度来讲，PV 技术作为一种新兴技术，其“技术因素”是其产业化的根本和产业化的基础。而 PV 技术是否真的具有产业化潜力还必须接受市场的检验，所以“市场因素”对 PV 技术产业化具有决定性的作用。PV 技术必须借助其他产业或行业才能生存，所以“产业因素”在 PV 技术产业化过程中扮演举足轻重的角色。任何技术的产业化，都必须与当前国家的相关产业政策相一致，PV 技术只有与这些政策相一致，才可能得到政府的大力支持和市场对该项技术的认可，从而吸引更多的人才、资金和其他技术，加快 PV 技术的产业化进程，所以“一致性因素”在 PV 技术产业化潜力评价中至关重要。保护和改善环境是当今时代的主题，PV 技术作为新型绿色能源技术，其产业化的生命线在于对环境的影响程度，所以“环境因素”应作为评价 PV 技术产业化潜力必须考虑的因素之一。因此，本文最终考虑将“技术因素”、“市场因素”、“产业因素”、“一致性因素”、“环境因素”确定为 PV 技术产业化潜力评价的五个评价准则。

根据指标构建原则，我们将五个一级指标细分到二级指标，各个指标与 PV 技术的表现有机联系，构成一个层次分明的指标体系，如表 1 所示。需要重点说明的是，在技术因素中，转换效率及性能、成本优势、工艺复杂性体现了 PV 技术的先进性特点，利用的便利性说明该项技术受地理、气候环境的影响小，并可方便地与其他载体(如建筑。有关专家预测，光伏建筑一体化 BIPV(Building Integrated PV)将是 PV 技术大面积应用的未来方向)结合使用。PV 技术的投资风险、预期利润率以及市场增长潜力是作为新兴技术进入市场所特有的特征。产业因素中的人力资源指标在 PV 技术产业化进程中占有很重要的位置，光伏技术人员的缺乏将制约我国 PV 产业的发展。在一致性因素中，从政府部门、市场、投资者的角度来说，对一项 PV 技术将来发展的预见性至关重要，它将直接影响政府对该项技术的重视程度和投资者对该项技术投资市场的预期信心。在环境因素中，我们引入寿命期能耗指标，只有通过全寿命期能耗的角度去考察一项技术，才能真正评价该项技术对环境的直接或间接影响程度。

表 1. 准则、指标及其代码表

准则层	内容/代码	内容/代码	内容/代码	内容/代码	内容/代码
	技术因素/ C_1^1	市场因素/ C_2^1	产业因素/ C_3^1	一致性因素/ C_4^1	环境因素/ C_5^1
指标层	转换效率及性能/ $C_{1,1}^2$	投资风险/ $C_{2,1}^2$	可利用基础设施/ $C_{3,1}^2$	与经济发展一致性/ $C_{4,1}^2$	节约资源程度/ $C_{5,1}^2$
	成本优势/ $C_{1,2}^2$	市场增长潜力/ $C_{2,2}^2$	人力资源/ $C_{3,2}^2$	与科技政策一致性/ $C_{4,2}^2$	带动相关产业程度/ $C_{5,2}^2$
	工艺复杂性/ $C_{1,3}^2$	预期利润率/ $C_{2,3}^2$	预期资金投入/ $C_{3,3}^2$	与能源产业政策一致性/ $C_{4,3}^2$	寿命期能耗/ $C_{5,3}^2$
	标准形成可能性/ $C_{1,4}^2$	市场需求/ $C_{2,4}^2$	相关技术保障/ $C_{3,4}^2$	与技术预见的一致性/ $C_{4,4}^2$	改善环境程度/ $C_{5,4}^2$
	利用的便利性/ $C_{1,5}^2$		可利用的资源/ $C_{3,5}^2$		
	更新速度/ $C_{1,6}^2$				

表 2. 准则、指标层各因素权重值

代码	权重	代码	权重	代码	权重	代码	权重	代码	权重	
准则层 C_1^1	0.288	C_2^1	0.201	C_3^1	0.157	C_4^1	0.109	C_5^1	0.245	
指标层 $C_{1,1}^2$	0.222	$C_{2,1}^2$	0.285	$C_{3,1}^2$	0.157	$C_{4,1}^2$	0.217	$C_{5,1}^2$	0.353	
	$C_{1,2}^2$	0.176	$C_{2,2}^2$	0.353	$C_{3,2}^2$	0.288	$C_{4,2}^2$	0.285	$C_{5,2}^2$	0.217
	$C_{1,3}^2$	0.144	$C_{2,3}^2$	0.217	$C_{3,3}^2$	0.245	$C_{4,3}^2$	0.353	$C_{5,3}^2$	0.285
	$C_{1,4}^2$	0.252	$C_{2,4}^2$	0.145	$C_{3,4}^2$	0.201	$C_{4,4}^2$	0.145	$C_{5,4}^2$	0.145
	$C_{1,5}^2$	0.112		$C_{3,5}^2$	0.109					
	$C_{1,6}^2$	0.094								

在 2010 第三届中国能源发展形势预测分析年会和第四届中国可再生能源发展论坛上，与会代表有来自国家能源局、中国投资协会能源发展研究中心、中国能源投资网、太阳能光伏电站、太阳能投资行业等的专家。我们邀请了其中 23 位专家参与太阳能技术产业化讨论，并通过问卷调查和访谈的方式对表 1 中涉及的相应指标及各指标相对于不同 PV 技术进行打分。通过统计整理得到权重结果如表 2 所示。通过比较，表 2 的权重与文献[8]的相关结论比较接近。

3.2 备选方案

从 19 世纪末光电效应的发现，到 1954 年美国贝尔实验室研制出第一只单晶硅太阳电池(其转换效率达到 6%)，再到如今多种材料以及更高转换效率 PV 技术的出现，PV 技术经历了漫长的发展历程。为了提高转换效率、降低生产成本，在不同的历史时期，涌现出了许多太阳能电池技术。我们在选择 PV 技术产业化潜力评价备选方案时，排除了那些明显没有产业化潜力的、不具代表性的太阳能电池技术，并将一些已经规模化(如单晶硅、多晶硅)的太阳能电池技术和尚处于研究阶段(如纳米晶太阳能电池)但具有一定开发前景的太阳能电池技术列入备选方案进行比较研

究。经本文整理，备选方案如表 3 所示。

表 3. 太阳能光伏电池技术列表(按材料分类)

技术	技术小类	方案代码
硅系太阳能电池	单晶硅	A ₁
	多晶硅	A ₂
	多晶硅薄膜	A ₃
	非晶硅薄膜	A ₄
	砷化镓	A ₅
多元化合物薄膜太阳能电池	碲化镉(CdTe)	A ₆
	铜铟镓硒(CIGS)	A ₇
聚合物多层修饰电极型太阳能电池		A ₈
纳米晶太阳能电池		A ₉

3.3 评价

利用模糊一致矩阵的方法对上述方案A₁-A₉进行优选的评价，计算过程如下：

步骤 1：建立优先关系矩阵：以第一个准则 C_1^1 的第一个指标 $C_{1,1}^2$ 为例，依据专家打分结果(见表 4)，由式(1)建立优先关系矩阵 B_1^1 ：

表 4. 专家针对方案 A₁₁ 打分表

方案	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
指标 $C_{1,1}^2$	7.33	6.24	5.78	5.69	4.79	7.42	6.03	5.31	5.02

$$B_1^1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 1.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 1.0 & 1.0 & 0.0 & 0.5 & 1.0 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 & 1.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

步骤 2: 将 B_1^l 由(2)式转换为模糊矩阵 R_1^l :

$$R_1^l = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.556 & 0.667 & 0.722 & 0.889 & 0.444 & 0.611 & 0.778 & 0.833 \\ 0.444 & 0.500 & 0.611 & 0.667 & 0.833 & 0.389 & 0.556 & 0.722 & 0.778 \\ 0.333 & 0.389 & 0.500 & 0.556 & 0.722 & 0.278 & 0.444 & 0.611 & 0.667 \\ 0.278 & 0.333 & 0.444 & 0.500 & 0.667 & 0.222 & 0.389 & 0.556 & 0.611 \\ 0.111 & 0.167 & 0.278 & 0.333 & 0.500 & 0.056 & 0.222 & 0.389 & 0.444 \\ 0.566 & 0.611 & 0.722 & 0.778 & 0.944 & 0.500 & 0.667 & 0.833 & 0.889 \\ 0.389 & 0.444 & 0.556 & 0.611 & 0.778 & 0.333 & 0.500 & 0.667 & 0.722 \\ 0.222 & 0.278 & 0.389 & 0.444 & 0.611 & 0.167 & 0.333 & 0.500 & 0.556 \\ 0.167 & 0.222 & 0.333 & 0.389 & 0.556 & 0.111 & 0.278 & 0.444 & 0.500 \end{bmatrix}$$

步骤 3: 计算单因素优度值

由(3)式计算 $C_{1,1}^2$ 的优度值为: $s_{1,1}^{2,1} = 0.152$ 、 $s_{1,1}^{2,2} = 0.139$ 、 $s_{1,1}^{2,3} = 0.112$ 、 $s_{1,1}^{2,4} = 0.098$ 、 $s_{1,1}^{2,5} = 0.054$ 、 $s_{1,1}^{2,6} = 0.166$ 、 $s_{1,1}^{2,7} = 0.125$ 、 $s_{1,1}^{2,8} = 0.084$ 、 $s_{1,1}^{2,9} = 0.070$ 。

表 5. PV 技术的优度值

方案指标	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉
$C_{1,1}^2$	0.152	0.139	0.112	0.098	0.054	0.166	0.125	0.084	0.070
$C_{1,2}^2$	0.053	0.069	0.083	0.097	0.125	0.125	0.131	0.151	0.165
$C_{1,3}^2$	0.054	0.07	0.145	0.145	0.105	0.105	0.165	0.125	0.084
$C_{1,4}^2$	0.159	0.159	0.132	0.132	0.112	0.098	0.084	0.07	0.055
$C_{1,5}^2$	0.062	0.062	0.139	0.152	0.119	0.119	0.165	0.091	0.091
$C_{1,6}^2$	0.125	0.139	0.166	0.152	0.091	0.091	0.112	0.07	0.054
$C_{2,1}^2$	0.125	0.166	0.152	0.139	0.091	0.091	0.112	0.07	0.054
$C_{2,2}^2$	0.125	0.139	0.152	0.166	0.091	0.091	0.112	0.07	0.054
$C_{2,3}^2$	0.084	0.132	0.152	0.165	0.105	0.105	0.132	0.07	0.054
$C_{2,4}^2$	0.139	0.166	0.152	0.125	0.105	0.105	0.084	0.07	0.054
$C_{3,1}^2$	0.152	0.166	0.139	0.125	0.105	0.105	0.084	0.054	0.07
$C_{3,2}^2$	0.159	0.159	0.139	0.125	0.098	0.098	0.098	0.07	0.055
$C_{3,3}^2$	0.119	0.166	0.152	0.139	0.098	0.084	0.119	0.07	0.054
$C_{3,4}^2$	0.165	0.152	0.132	0.132	0.112	0.091	0.091	0.07	0.054
$C_{3,5}^2$	0.119	0.119	0.152	0.165	0.098	0.077	0.077	0.139	0.054
$C_{4,1}^2$	0.105	0.105	0.152	0.165	0.062	0.062	0.139	0.125	0.084
$C_{4,2}^2$	0.084	0.098	0.139	0.166	0.07	0.054	0.112	0.125	0.152
$C_{4,3}^2$	0.125	0.139	0.152	0.166	0.091	0.091	0.112	0.07	0.054
$C_{4,4}^2$	0.125	0.139	0.165	0.152	0.062	0.062	0.112	0.098	0.084
$C_{5,1}^2$	0.054	0.07	0.125	0.139	0.091	0.091	0.112	0.152	0.166
$C_{5,2}^2$	0.132	0.132	0.165	0.152	0.084	0.084	0.084	0.112	0.054
$C_{5,3}^2$	0.055	0.07	0.139	0.159	0.091	0.091	0.125	0.159	0.112
$C_{5,4}^2$	0.084	0.098	0.125	0.165	0.062	0.062	0.112	0.152	0.139

同理, 可计算其他单因素的优度值, $C_{1,2}^2$ 的优度值为: $s_{1,2}^{2,1} = 0.053$ 、 $s_{1,2}^{2,2} = 0.069$ 、 $s_{1,2}^{2,3} = 0.083$ 、

$s_{1,2}^{2,4} = 0.097$ 、 $s_{1,2}^{2,5} = 0.125$ 、 $s_{1,2}^{2,6} = 0.125$ 、 $s_{1,2}^{2,7} = 0.131$ 、 $s_{1,2}^{2,8} = 0.151$ 、 $s_{1,2}^{2,9} = 0.165$ 。

$C_{1,3}^2$ 的优度值为: $s_{1,3}^{2,1} = 0.054$ 、 $s_{1,3}^{2,2} = 0.070$ 、 $s_{1,3}^{2,3} = 0.145$ 、 $s_{1,3}^{2,4} = 0.145$ 、 $s_{1,3}^{2,5} = 0.105$ 、 $s_{1,3}^{2,6} = 0.105$ 、 $s_{1,3}^{2,7} = 0.165$ 、 $s_{1,3}^{2,8} = 0.125$ 、 $s_{1,3}^{2,9} = 0.084$ 。

$C_{1,4}^2$ 的优度值为: $s_{1,4}^{2,1} = 0.159$ 、 $s_{1,4}^{2,2} = 0.159$ 、 $s_{1,4}^{2,3} = 0.132$ 、 $s_{1,4}^{2,4} = 0.132$ 、 $s_{1,4}^{2,5} = 0.112$ 、 $s_{1,4}^{2,6} = 0.098$ 、 $s_{1,4}^{2,7} = 0.084$ 、 $s_{1,4}^{2,8} = 0.070$ 、 $s_{1,4}^{2,9} = 0.055$ 。

$C_{1,5}^2$ 的优度值为: $s_{1,5}^{2,1} = 0.062$ 、 $s_{1,5}^{2,2} = 0.062$ 、 $s_{1,5}^{2,3} = 0.139$ 、 $s_{1,5}^{2,4} = 0.152$ 、 $s_{1,5}^{2,5} = 0.119$ 、 $s_{1,5}^{2,6} = 0.119$ 、 $s_{1,5}^{2,7} = 0.165$ 、 $s_{1,5}^{2,8} = 0.091$ 、 $s_{1,5}^{2,9} = 0.091$ 。

$C_{1,6}^2$ 的优度值为: $s_{1,6}^{2,1} = 0.125$ 、 $s_{1,6}^{2,2} = 0.139$ 、 $s_{1,6}^{2,3} = 0.166$ 、 $s_{1,6}^{2,4} = 0.152$ 、 $s_{1,6}^{2,5} = 0.091$ 、 $s_{1,6}^{2,6} = 0.091$ 、 $s_{1,6}^{2,7} = 0.112$ 、 $s_{1,6}^{2,8} = 0.070$ 、 $s_{1,6}^{2,9} = 0.054$ 。

同理, 可计算其他因素的优度值, 其计算结果如表 5 所示:

步骤 4: 多因素、多层次备选方案总排序

在基于表 5 的数据和前面得到的各指标权重的基础上, 由(4)式和(5)式计算得备选方案 A_i 相对于总目标的评价值, 由从而可以得出各技术的产业化潜力排名顺序, 见表 6。

表 6 PV 技术产业化潜力评价结果

方案	技术因素优度值	市场因素优度值	产业因素优度值	一致性因素优度值	环境因素优度值	总体优度值	排序
A ₁	0.032	0.024	0.023	0.012	0.019	0.108	5
A ₂	0.033	0.030	0.024	0.013	0.021	0.122	3
A ₃	0.036	0.031	0.022	0.016	0.034	0.139	2
A ₄	0.036	0.031	0.021	0.018	0.037	0.142	1
A ₅	0.029	0.019	0.016	0.008	0.021	0.093	8
A ₆	0.035	0.019	0.014	0.008	0.021	0.097	7
A ₇	0.036	0.023	0.015	0.013	0.027	0.113	4
A ₈	0.028	0.014	0.012	0.011	0.035	0.100	6
A ₉	0.025	0.011	0.009	0.010	0.030	0.085	9

由上表可以看出, A₁-A₉各技术产业化潜力的排序为: 5、3、2、1、8、7、4、6、9。即“非晶硅薄膜技术”最具产业化潜力。通过对结果的分析我们可以看出, 非晶硅薄膜技术、多晶硅薄膜技术、铜铟镓硒(CIGS)薄膜技术排名分别为1、2、4, 均在前五名。薄膜太阳能电池技术与建筑节能良好的契合性, 使薄膜技术近年来发展势头迅猛, 排序结果也正好反映了市场对太阳能薄膜技术的期待。多晶硅技术(其排名为3)

由于其发展历史较长，在市场占有相当大的份额，所以仍具有一定的发展潜力。而单晶硅技术(排名5)因其高能耗和高成本将有被其他技术取代的可能性，其发展潜力不容乐观。聚合物多层修饰电极型太阳能电池技术(排名为6)以有机聚合物代替无机材料，是刚刚开始的一个太阳能电池制造的研究方向，由于有机材料柔性好，制作容易，材料来源广泛，成本底等优势，从而对大规模利用太阳能，提供廉价电能具有重要意义。从技术预见的角度业讲，该技术仍具有一定的产业化潜力。碲化镉(CdTe)和砷化镓(排名分别为7和8)由于其加工过程中产生的剧毒对环境的影响较大，其产业化进程存在瓶颈。而纳米晶太阳能电池(排名为9)因其处于研究试验阶段，距离产业化生产还将有一定的距离。

4、结论

本文将太阳能PV技术纳入新兴技术的研究范畴，结合太阳能PV技术作为新兴清洁能源技术的特点，从寿命周期的宏观视角，融入了未来社会发展以低碳经济为主导的思想，构建了太阳能PV技术产业化潜力评价指标体系，运用模糊一致性矩阵对太阳能PV技术进行了实证分析。结果表明，模糊一致矩阵决策方法可有效避开AHP方法一致性检验时存在的缺陷和模糊综合评判方法隶属函数建立的困难，从而使操作方便可行。但本文也有其不足之处，其一，太阳能PV技术作为一种新兴技术，全面了解各种太阳能PV技术的专家很少，这在问卷调查时各专家会根据自身从事的技术而有所偏向，所以数据的全面性和准确性有待进一步改善。其二，如在某一因素下建立的优先关系系数可以反映出技术之间的优劣，但对于定量指标优劣的差异程度却不能很好体现不出来，所以需要采用不同的方法进行评价，相互进行验证，才可以为决策部门提供切合实际的优选结果和咨询意见。

致 谢

感谢中国能源投资网为我们获得评价数据提供的极大帮助。对各位专家、学者在问卷调查和访谈中的

无私精神表示诚挚的谢意。王振全教授在模型构建及论文写作诸方面提出了很多合理化的建议，在此表示衷心的感谢。

References (参考文献)

- [1] Geroge S.Day, Paul J.H.Schoemaker, Robert E.Gunther. Whar-ton on Managing Emerging Technologies[M]. New York: John Wiley & Sons , Inc, 2000. 1-98.
- [2] Zhao Zhenyuan, Yin Lu, On the Real Options Thinking and Some Application in the Management of Emerging Technolo-gies[J], *Forecasting*, 2005, 24(2), P20-24 (Ch).
赵振元, 银路, 实物期权思维及其在新兴技术管理中的若干应用[J], *预测*, 2005, 24(2), P20-24.
- [3] Wu Dong, Zhang HuiYan, The Influence of the Emerging Tech-nologies to the Business Management and Some Countermea-sures[J], *Sci-Technology and Management*, 2005,1,P67-69 (Ch).
吴东, 张徽燕, 论新兴技术对企业管理的影响及对策[J], *科技与管理*, 2005, 1, P67-69.
- [4] Moncada-Paterno-Castelb P, Rojo J, Bellido F. IPTS-TIM-Software V.1.1, A tool to help experts evaluate the marketa-bility potential of new technologies[J], European commission -IPTS-TIM, 1999.
- [5] Solar Advisor Model User Guide [EB/OL]. <https://www.nrel.gov/analysis/sam/download.html>.
- [6] Ma, HuiMin, Ye Chunming, BP Neural Network in the Industri-alization of Patent Technology Application in Screening As-sessment[J] *Science and Technology Management Research*, 2005, 6, P94-97 (Ch).
马慧民, 叶春明, BP神经网络在专利技术产业化筛选评估中的应用研究[J], *科技管理研究*, 2005, (6), P94-97.
- [7] Qin Yuanjian, Caicheng, An AHP Evaluation Model for Electric Vehicle Industrialization Levels[J] *Journal of WUT*, 2004, 26(6), P277-281 (Ch).
秦远建, 蔡程, 电动汽车产业化水平AHP评价模型研究[J], *武汉理工大学学报*, 2004, 26(6), P277-281.
- [8] Lu Wenguang, Huang Lucheng, Study on Emerging Technology Selection and Evaluation by Technology Foresight and Fuzzy Consistent matrix[J] *Studies in Science of Science*, 2008, 26(6), P1201-1209 (Ch).
卢文光, 黄鲁成, 新兴技术产业化潜力评价与选择的研究[J], *科学学研究*, 2008, 26(6), P1201-1209.
- [9] Chen Shilong, Fuzzy Consistent Matrix and Its Properties[J], *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2002, 16, P86-90 (Ch).
陈式龙, 模糊一致矩阵及其性质[J], *模糊系统与数学*, 2002, 16, P86-90.
- [10] Yao Min, Zhang Sen, Fuzzy Consistent Matrix and Its Applica-tion in Decision Making[J] *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1998, 5, P78-81 (Ch).
姚敏, 张森, 模糊一致矩阵及其在决策分析中的应用[J], *系统工程理论与实践*, 1998, 5, P78-81.