

改进贝叶斯更新赋权下的光伏组件可回收性评价方法研究

张润

合肥工业大学 230000

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21207

[摘要] 随着退役光伏组件数量增加,组件进入回收环节前的可回收性判断变得更加重要。现有评价中,指标权重往往受专家经验影响较大,而企业样本数据又存在连续型指标与评分型指标并存的情况,直接采用统一赋权方式容易削弱评价结果的解释力。本文围绕光伏组件回收过程构建可回收性评价指标体系,将评价内容划分为回收潜力、环境影响、经济效益和设计优化度四个方面,选取材料回收率、材料分离效率、碳减排潜力、回收成本收益率、拆解时间成本、易拆解性等指标作为主要评价依据。在权重确定上,对贝叶斯更新方法进行适配改进:采用Beta分布描述指标先验权重,并根据连续型定量指标和等级型定性指标的不同特征分别构建似然函数,使专家判断、历史认知和样本数据能够在同一框架下进行修正。该方法有助于减少单一主观赋权带来的偏差,使评价结果更贴近光伏组件回收的实际过程,可为退役组件分级管理、回收路径选择和资源配置提供方法支撑。

[关键词] 光伏组件;可回收性评价;多指标赋权;贝叶斯更新

前言

在“双碳”目标持续推进和光伏产业快速发展的背景下,光伏组件装机规模不断扩大,退役组件的回收处理问题也逐渐凸显。退役光伏组件中含有玻璃、铝、硅、银等多种可回收材料,若能进行规范化、高值化回收,不仅可以提高资源利用效率,也有助于减少不当处置可能带来的环境风险。

光伏组件可回收性评价属于多指标综合评价问题。不同组件在材料组成、封装结构、老化程度、拆解难度、经济收益和环境影响等方面存在差异,单一指标难以全面反映其回收价值。因此,有必要从资源、环境、经济和设计等角度构建评价指标体系,并合理确定指标权重。现有主观赋权方法能够体现专家经验,但易受判断偏差影响;客观赋权方法能够反映样本差异,却对数据规模和分布特征较为敏感。贝叶斯更新方法可融合先验经验与样本数据,较适合用于光伏组件可回收性评价场景。本文围绕光伏组件可回收性评价需求,对贝叶斯更新赋权方法进行适配改进,以增强评价结果的合理性和工程解释性。

一、光伏组件可回收性评价与贝叶斯更新赋权的核心关联

(一) 光伏组件可回收性评价的核心内涵

光伏组件可回收性评价是对退役组件在回收阶段材料回收、环境影响、经济收益和结构适配程度的综合判断。对于退役光伏组件而言,可回收性并不只是判断其“能否回收”,更重要的是判断其在既定回收技术、工艺条件和企业管理水平下,能否实现高值化、规范化的绿色回收。光伏组件由玻

璃、铝边框、电池片、封装胶膜、背板、接线盒等多种材料和结构单元组成,不同部分在回收价值、拆解难度、分离效率和环境风险方面差异明显。因此评价过程需要同时考虑材料回收率、材料分离效率、再使用率、再制造率、碳减排潜力、生态毒性潜力、回收成本收益率、拆解时间成本、易拆解性、材料兼容性和模块化程度等指标。只有通过多维度指标共同刻画,才能较全面地反映退役组件的综合可回收水平。

(二) 多指标赋权在可回收性评价中的作用

在光伏组件可回收性评价中,不同指标对评价结果的影响程度并不相同。例如回收成本收益率直接关系到企业是否具备持续处理动力;材料回收率和材料分离效率反映资源化利用水平;拆解时间成本影响处理效率;碳减排潜力和生态毒性潜力则体现环境绩效;易拆解性、材料兼容性和模块化程度反映组件设计对后续回收过程的支持程度。因此指标权重的确定是综合评价中的关键环节。若权重设置过于依赖专家经验,评价结果可能受到主观偏好影响;若完全依赖样本数据,则可能忽略光伏组件回收中的工程认知和行业规律。科学的赋权方法应能够在专家判断、历史经验和样本数据之间形成合理平衡,使评价结果既具有数据支撑,又符合实际回收场景。

(三) 贝叶斯更新赋权的适配优势

贝叶斯更新方法是一类能够融合先验信息与样本证据的组合赋权方法。其基本逻辑是先根据专家经验、历史样本和行业认知形成初始权重判断,再利用实际样本数据对权重进

行修正, 最终得到后验权重结果。与单纯主观赋权或客观赋权相比, 贝叶斯更新方法更适合处理光伏组件可回收性评价中的不确定性问题。在光伏组件回收场景中, 部分指标具有较强工程经验属性, 如易拆解性、材料兼容性和模块化程度, 需要专家判断参与; 除此之外, 材料回收率、材料分离效率、回收成本收益率等指标又能够通过企业实测数据获得。贝叶斯更新方法能够将这两类信息纳入同一权重更新过程, 使评价结果更具适应性和解释性。

(四) 改进贝叶斯更新与企业回收决策的协同逻辑

改进贝叶斯更新赋权方法可将企业历史数据、专家判断和样本实测信息纳入同一评价框架。其基本过程包括先验权重设定、指标数据标准化、分类似然函数构建、后验权重更新和评价结果输出。通过这一过程, 原本分散的材料、环境、经济和结构信息可转化为可比较的综合评价依据, 为后续分级管理和回收路径选择提供支撑。

二、光伏组件可回收性评价中赋权方法的现存问题

(一) 专家经验与样本数据融合不足, 权重结果易受单一信息影响

现有可回收性评价中, 部分方法主要依赖专家经验确定指标权重。此类方法能够体现行业知识和工程判断, 但不同专家在回收价值、环境风险和经济收益等方面的关注重点可能存在差异, 容易导致权重结果带有较强主观性。特别是在光伏组件结构复杂、回收路径多样的情况下, 单纯依赖专家判断难以充分反映不同批次样本之间的真实差异。样本数据的客观赋权方法也存在局限。企业实际回收数据往往受到样本来源、组件类型、老化程度、检测条件和数据完整性的影响, 若仅根据数据离散程度确定权重, 可能出现某些短期波动较大的指标被过度放大, 而具有长期工程意义的关键指标被弱化的问题。因此如何有效融合专家经验与样本数据, 是提升光伏组件可回收性评价可靠性的关键。

(二) 指标数据类型差异明显, 统一建模难以反映评价特征

光伏组件可回收性评价指标具有明显的混合数据特征。其中, 材料回收率、材料分离效率、回收成本收益率、拆解时间成本等指标多属于连续型定量数据, 可通过企业记录、实验测试或成本核算获得; 而易拆解性、材料兼容性和模块化程度等指标则更多依赖专家评分, 具有等级型和定性化特征。若对所有指标采用统一的似然函数或同一赋权处理逻辑, 容易忽略不同指标的数据属性差异。例如, 连续型指标更适合通过均值、方差等统计特征刻画其样本分布, 而等级型指标则更需要体现不同评分等级的出现频率和专家判断一致

性。传统贝叶斯更新方法若不对似然函数进行分类改进, 就可能削弱后验权重的合理性, 使评价结果难以准确反映光伏组件回收过程中的真实特征。

(三) 评价结果与工程应用衔接不足, 难以支撑企业分级管理

可回收性评价的目的并不是单纯得到一组指标权重, 而是服务企业实际回收决策。若评价结果不能解释不同样本在回收价值、环境表现和处理效率上的差异, 就难以支撑样本分级、处理优先级安排和资源投入优化。另一方面, 若方法过于复杂, 也会增加企业应用成本。因此, 赋权方法不仅要关注计算结果, 还应兼顾稳定性、解释性和工程可操作性。

三、改进贝叶斯更新赋权下的可回收性评价优化策略

(一) 构建面向光伏组件回收过程的评价指标体系

组件退役后能否实现高值化、规范化和绿色化回收, 既取决于资源回收与再利用的实现程度, 也取决于回收活动对环境的影响、回收过程的经济投入产出关系, 以及产品自身设计对后续拆解和分离的支持程度。基于这一特点, 本文将光伏组件可回收性评价划分为回收潜力、环境影响、经济效益和设计优化度四个一级指标。其中回收潜力主要反映组件资源化利用能力, 包括再使用率、再制造率、材料回收率和材料分离效率; 环境影响主要反映回收过程对减排和污染控制的贡献, 包括碳减排潜力、资源消耗减少潜力和生态毒性潜力; 经济效益主要反映回收活动的投入产出关系, 包括回收成本收益率、拆解时间成本和材料价值密度; 设计优化度主要反映组件结构设计对拆解和回收的支持程度, 包括易拆解性、材料兼容性和模块化程度。

在评价前, 应根据指标属性进行标准化处理。其中再使用率、再制造率、材料回收率、材料分离效率、碳减排潜力、资源消耗减少潜力、回收成本收益率、材料价值密度、易拆解性、材料兼容性和模块化程度指标属于效益型指标, 数值越大表示表现越优; 生态毒性潜力和拆解时间成本属于成本型指标, 数值越小越优。通过标准化处理, 可消除不同指标在量纲、数量级和方向上的差异。

(二) 优化贝叶斯更新的先验权重设定

传统贝叶斯更新方法多将指标先验权重设为均匀分布, 默认各指标在评价初始阶段具有相同重要性。该设定便于计算, 却难以反映光伏组件回收过程中不同指标的作用差异。回收成本收益率、材料回收率、材料分离效率和易拆解性等指标, 直接影响企业的回收方案选择、处理效率和成本控制。若先验阶段仍采用完全等权设定, 关键指标的工程价值容易

被弱化。

本文采用 Beta 分布描述单个指标的先验权重。Beta 分布具有取值范围在 0 到 1 之间、形态灵活、参数可调等特点，适合表达指标权重的非负性和有界性。先结合专家判断、历史样本信息和光伏组件回收经验确定各指标的先验参数，再计算对应的初始权重，并对全部指标进行归一化处理，使其满足权重非负且总和为 1 的要求。通过这种方式，先验权重既保留专家经验，又能避免完全主观设定带来的偏差。

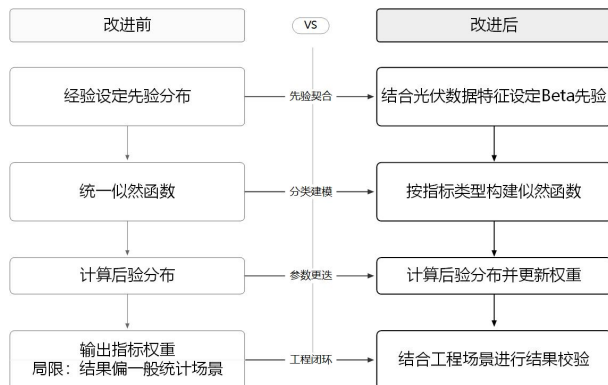


图2 改进贝叶斯更新赋权流程

（三）分类构建不同指标的似然函数

光伏组件可回收性评价指标既包括连续型定量指标，也包括等级型定性指标。若采用统一似然函数处理全部指标，容易忽略指标数据特征差异，影响后验权重的合理性。本文根据指标类型对似然函数进行分类构建。对于材料回收率、材料分离效率、回收成本收益率、拆解时间成本等连续型指标，采用正态分布似然函数刻画样本数据的均值和波动特征，使权重更新能够反映企业实际样本中的数据差异。对于易拆解性、材料兼容性和模块化程度等等级型指标，则依据专家评分结果构建离散型似然函数，通过不同评分等级的出现频率反映该指标对评价结果的支持程度。这种分类建模方式能够更好适应光伏组件可回收性评价中的混合数据结构，使连续型指标的数据波动和等级型指标的专家判断都能进入权重更新过程，从而提高后验权重的解释力。

（四）完善后验权重更新与工程合理性复核流程

在完成先验权重设定和似然函数构建后，依据贝叶斯更新思想计算各指标后验权重。具体流程包括：首先整理企业样本数据，并根据指标属性完成标准化处理；其次根据专家判断和历史数据形成先验权重；再次根据指标类型分别构建连续型和等级型似然函数；随后计算后验权重并进行归一化；

最后将后验权重结果与光伏组件回收中的关键关注点进行对照分析。工程合理性复核是本文改进方法中的重要环节。若某些指标在统计计算上获得较高权重，但与实际回收场景中的材料价值、拆解效率、环境风险或企业收益逻辑明显不符，则需要返回前序步骤，对先验参数或似然表达进行重新检查。通过这一过程，改进贝叶斯更新方法不仅能够完成数学意义上的权重更新，也能够保证权重结果与光伏组件回收实践保持一致。

四、结语

本文围绕退役光伏组件可回收性评价中权重难以确定的问题，对贝叶斯更新方法进行适配改进。研究通过构建回收潜力、环境影响、经济效益和设计优化度四个维度的评价指标体系，引入 Beta 分布先验、分类似然函数和工程合理性复核环节，使权重结果更贴合光伏组件实际回收场景。该方法可结合专家经验与样本数据进行动态修正，有助于提高可回收性评价结果的解释性，为退役组件分级管理、回收路径选择和资源配置优化等方面提供参考。后续可进一步扩大样本来源，引入不同企业、不同技术路线和不同类型组件的数据，对评价模型进行持续修正和推广应用，以提升光伏组件回收评价方法的适用性和工程应用价值。

【参考文献】

- [1] 中国光伏行业协会. 中国光伏产业发展路线图(2024—2025年)[R]. 北京: 中国光伏行业协会, 2025.
- [2] 刘佳, 罗涛, 吴潇笑, 等. 废弃光伏组件回收技术发展现状与展望[J]. 热力发电, 2026, 55(01): 1-10.
- [3] Wang X, Tian X, Chen X, et al. A review of end-of-life crystalline silicon solar photovoltaic panel recycling technology[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 248: 111976.
- [4] Polverini D, Alfieri F, Spiliotopoulos C. Towards a recyclability index for photovoltaic modules: Methodology, challenges and policy implications[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2024, 33(9): 935-943.
- [5] Yet B, Tuncer Şakar C. Estimating criteria weight distributions in multiple criteria decision making: a Bayesian approach[J]. Annals of Operations Research, 2020, 293(2): 495-519.