© 2025年。本手稿版本依据 CC-BY-NC-ND 4.0 许可协议提供，
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/

用于辅助多准则可再生能源评估的主客观中位数重要性技术（SOMIT）

Ding Ding [a, †, 0000-0002-1038-7558], Yang Li [a, †, 0009-0007-4368-9732], Poh Ling Neo [a, †, 0000-0003-3710-5976], Zhiyuan Wang [a, †, *, 0000-0001-7867-7626], Chongwu Xia [a, †, 0000-0002-9343-4670]

[a] 新加坡社科大学商学院，新加坡 599494，新加坡 * 通讯作者：Zhiyuan Wang，电子邮件：zywang@suss.edu.sg

† 所有作者对本研究的贡献均相同，并按姓氏字母顺序排列

摘要

加速可再生能源转型，需要开展充分知情的决策，综合考虑不同可再生能源技术在财务、技术、环境和社会方面的多样化权衡。在这一多准则决策（MCDM）过程中，确定适当的准则权重是关键步骤。然而，这些权重的确定往往仅依赖决策者的主观评估或客观赋权方法，而二者在认知负担、潜在偏差和情境相关性不足等方面均存在局限。本研究提出了主客观中位数重要性技术（SOMIT），这是一种用于确定多准则决策（MCDM）中准则权重的新型混合方法。通过将SOMIT针对可再生能源评估进行定制，该方法直接支持碳中和目标下的应用能源系统规划、政策分析和技术优先级排序。SOMIT的实用价值通过印度和沙特阿拉伯可再生能源决策中的两个多准则决策（MCDM）案例研究得到验证。利用SOMIT得出的权重，逼近理想解排序法（TOPSIS）对可再生能源方案进行排序，其中太阳能在两个案例中均取得了最高的性能得分（例如，在印度案例中为0.5725）。本研究的主要贡献有五点：1）所提出的SOMIT将所需主观比较的数量从传统的二次数量级降至线性数量级；2）SOMIT对备选方案-准则矩阵（ACM）中的离群值具有更强的稳健性；3）SOMIT平衡了主观专家知识与客观数据驱动的洞见，从而减轻偏差；4）SOMIT具有内在的模块化特征，其各个组成部分以及完整方法均可与能源系统和政策分析中常用的广泛多准则决策方法无缝结合；5）为SOMIT开发了专用Python库pysomit，

为在实际可再生能源评估和决策支持应用中实施SOMIT提供了易于使用且高效的工具。

关键词：
可再生能源评估 多准则决策 主客观中位数重要性技术
TOPSIS 方法 碳中和

1. 引言

面对日益加剧的气候变化、不断减少的化石燃料储量以及不断增长的能源需求，可再生能源已成为全球实现可持续且具有韧性的未来能源的重要支柱（Halkos & Gkampoura，2020）。与传统能源相比，可再生能源（例如太阳能、风能、水力发电、地热能和生物质能）具有双重优势：既能减少温室气体排放，又能提升能源安全（Tutak & Brodny，2022）。过去十年间，技术的重大进步、政策激励和成本下降推动了可再生能源系统在全球范围内的加速部署（Hassan 等人，2024）。随着各国努力实现碳中和目标并实现能源组合多元化，可再生能源已不再仅仅被视为一种备选方案，而是现代能源战略的核心支柱（Rabbi 等人，2022）。

《巴黎协定》等国际合作，以及国家政策和投资流动，进一步巩固了可再生能源在制定长期能源规划中的作用。此外，公众对清洁能源的认知不断提高，对清洁能源的需求日益增长，促使政府和产业加快向低碳能源解决方案转型。这一全球趋势在亚洲尤为显著。亚洲人口超过全球一半，也是经济增长最快的地区之一。中国、印度和东盟（东南亚国家联盟）成员国等国家和地区，正因快速的城市化、工业化和生活水平提高而面临能源需求激增（Anwar 等人，2022年）。与此同时，该地区拥有巨大的可再生能源潜力，使向清洁能源转型既成为可持续发展的必要之举，也带来了发展机遇（Li 等人，2020年）。这些挑战凸显了制定适用于能源规划和政策的先进决策支持工具的必要性。尤其是，确定合适的

环境、技术、财务和社会准则的权重，是使可再生能源战略与碳中和及可持续发展目标保持一致的关键步骤。

尽管可再生能源的发展势头日益强劲，但具体技术的选择与优先排序仍是一项复杂且多层面的挑战（Sitorus & Brito-Parada，2020年）。决策者必须考虑范围广泛且往往相互冲突的准则，例如，在最大限度降低财务成本的同时，实现环境可持续性最大化（Terlouw 等人，2023年），或在技术性能与社会接受度之间取得平衡（Hassan 等人，2022年）。这些准则通常涵盖多个类别和领域，包括财务因素（例如资本成本、运营费用）、技术属性（例如效率、技术成熟度）、环境影响（例如温室气体排放、土地总使用量）以及社会因素（例如就业创造、社会接受度）。这些维度之间固有的权衡关系使评估过程远非简单明了，尤其是在利益相关者优先事项和区域条件存在显著差异的情况下。因此，选择最合适的可再生能源方案需要一种结构化且透明的方法，以同时纳入客观的定量数据和主观的定性判断（Karunathilake 等人，2019年）。

在这方面，多准则决策（MCDM）方法因能够处理复杂且多样的准则，以支持充分知情的决策分析，已在全球范围内广泛应用于可再生能源评估。通过广泛梳理多准则决策方法在可再生能源评估中的应用文献，我们发现，确定评估标准的权重仍是决策者面临的最关键且最具挑战性的任务之一。这些权重直接影响决策过程的结果，但权重赋予往往涉及主观性、不一致性、偏差或沉重的认知负担。此外，现有的多准则决策应用通常仅依赖主观或客观赋权方法之一，而这两种方法都可能引入偏差，或忽略决策情境中的关键因素。

为解决这些不足，本研究提出一种新颖的混合赋权方法，称为主客观中位数重要性技术（SOMIT）。该方法通过三部分框架，将根据决策者评估得出的主观权重与从 ACM 获得的数据驱动客观权重相结合。在第一部分，决策者主要将所有准则与单一的中位数重要性参考标准进行两两比较，从而大幅减少比较次数，使其降至线性级别（即数量级为 n 次比较，呈线性规模）。在第二部分，根据 ACM 中各准则经归一化的中位数离散度推导客观权重，

以捕捉数据驱动的变异和重要性。在第三部分，通过乘法合成结合主观权重与客观权重，得出所有准则的最终平衡权重。SOMIT 的主要优势包括：1）将主观成对比较从二次复杂度降至线性复杂度，减轻认知负荷；2）对 ACM 中的离群值更具稳健性；3）平衡人类专业知识与实证数据，减轻纯主观或纯客观赋权方法可能产生的偏差；4）采用模块化设计，可将各个部分或完整方法无缝结合到多种多准则决策方法中；5）开发了易于使用的 Python 库 pysomit，以便于实际应用 SOMIT 方法。

如前所述，尽管既有文献中的研究已证明多准则决策在可再生能源评估中的价值，但很少有研究明确将赋权阶段视为能源政策挑战。在此背景下，所提出的SOMIT方法不仅提升了方法学严谨性，还通过减轻专家的认知负担、提高稳健性，并确保纳入关键的能源系统维度（如温室气体减排、土地利用和社会接受度），增强了应用能源决策。值得注意的是，本研究将SOMIT置于应用能源领域的背景下；在这一领域，为实现碳中和并确保可持续能源转型，需要平衡财务、技术、环境和社会方面的权衡。通过印度和沙特阿拉伯的可再生能源案例研究，本研究展示了SOMIT在可再生能源规划与决策中的直接适用性。由此，本研究明确将方法学贡献与能源应用层面相衔接，借助一个能够考量可再生能源多维影响的结构化决策框架，支持能源资源的优化利用，并与全球迈向净零未来的趋势保持一致。

本文其余部分安排如下。第 2 节回顾可再生能源应用中多准则决策和赋权方法的相关文献。第 3 节介绍提出的 SOMIT 赋权方法，阐述其通过三个部分推导准则权重的方法。本节还简要介绍广泛使用的逼近理想解排序法（TOPSIS）多准则决策方法；本研究采用该方法，利用 SOMIT 得出的权重对可再生能源方案进行排序。第 4 节将这些方法应用于印度和沙特阿拉伯的两个案例研究，展示详细结果，并提炼对可再生能源规划的重要启示。第 5 节进一步深入讨论研究结果，并将 SOMIT 与两种成熟的赋权方法进行比较。最后，第 6 节总结本研究，并对未来研究提出建议。

2. 文献综述

可再生能源发挥着核心作用，通过以更清洁的能源替代化石燃料（Tian 等人，2022），助力实现碳中和目标；这一目标要求从源头减少排放。碳中和是指使排放到大气中的温室气体数量与移除或抵消的等量温室气体相平衡，从而实现净零未来（Chen 等人，2024）。这些可再生能源几乎不产生或完全不产生碳排放，并能够自然再生。世界各国纷纷将碳中和纳入实现可持续未来的战略。欧盟成员国、日本、韩国、加拿大和中国等国家和地区已制定中长期目标，通常力争在 2050 年或 2060 年前实现净零排放（Dafnomilis 等人，2023）。它们也在推进可再生能源和绿色技术，以实现这些目标。这些承诺包括逐步摆脱化石燃料、投资清洁能源、提高能源效率，以及保护森林等天然碳汇。通过追求碳中和，各国不仅旨在减轻气候变化的影响，还力求促进创新、增强能源安全并推动绿色经济增长，从而为地球塑造更具韧性、更加可持续的未来（Qamruzzaman 和 Karim，2024）。

针对可再生能源系统中的多准则决策应用，Zhang 等人（2019）采用混合多准则决策方法评估中国福建的可再生能源项目，评估重点涵盖经济（如投资成本）、技术（如技术成熟度和效率）、环境（如温室气体排放）和社会（如就业创造）等准则。Rahim 等人（2020）采用多准则决策方法，根据技术、经济、环境和社会等方面的准则，选择马来西亚最合适的可再生能源来源。Solangi 等人（2021）采用综合多准则决策技术，评估巴基斯坦可再生能源部署面临的障碍并确定策略优先级。Bilgili 等人（2022）采用多准则决策方法，考虑经济、技术、环境、社会和政治等多个维度的准则，对土耳其可持续发展所需的可再生能源选项进行评估和排序。Prayogo 等人（2023）采用多准则决策方法，促进印度尼西亚太阳能光伏和风力涡轮机系统的发展。Ridha 等人（2023）采用多准则决策方法，评估并排序马来西亚和南非混合光伏（PV）、风能和电池系统的帕累托最优前沿解，同时考虑技术、经济、环境和可靠性等多项准则。Amiri 等人（2024）采用多准则决策方法，在沙特阿拉伯进行可再生能源来源选择，并考虑成本效益、土地保护和设计简洁性等准则。Li 等人

（2024）采用逼近理想解排序法，根据效率和经济表现选择用于风能开发的风力涡轮机。Vaziri Rad等人（2024）采用混合多准则决策框架，评估并确定农光互补应用中可持续能源系统配置的优先级，同时考虑环境、经济、技术、能源安全和社会目标。Kumar 和 Pamucar（2025）近期发表的一篇综述文章指出，利用多准则决策方法开展可持续能源规划正受到越来越多的关注。Sahoo等人（2025）还开展了一项全面综述，展示了多准则决策方法在全球可再生能源规划及应对可持续发展挑战中的应用。Tabrizi等人（2025）采用多准则决策方法，评估七国集团国家（即七个主要发达经济体：加拿大、法国、德国、意大利、日本、英国和美国）的可再生能源采用情况。Murtaja等人（2025）采用多准则决策方法，根据包括农村生活改善、就业创造、利用本地资源、社会接受度以及污染与噪声影响在内的六项准则，选择印度的最优可再生能源来源。

在推导准则权重时，根据 Hafezalkotob 等人（2019）的综述，Saaty（1990）提出的层次分析法（AHP）是最受欢迎的主观赋权方法。AHP 要求决策者进行两两比较，以表达各准则的相对重要性。然而，AHP 存在若干显著局限。首先，该方法要求对所有准则进行完整的两两比较（对于 n 个准则，比较次数约为 n^2，即呈二次增长），随着准则数量增加，这一过程会变得愈发繁琐（Carmone 等人，1997年），给决策者带来显著的认知负荷。其次，使用原始 AHP（Saaty，1990年）时，需要通过求解特征值—特征向量问题，从两两比较矩阵中推导权重；这在计算上并非易事，对于大多数决策者而言，若没有计算工具的帮助，实际操作也难以实现，尤其是在矩阵超过 3×3 这类可处理的规模时。尽管存在 AHP 的近似技术（Wang 等人，2020年），但它们得出的权重可能与原始特征值法得出的权重有所偏差，进而可能影响决策准确性。相比之下，客观赋权方法（例如广泛使用的基于准则间相关性的准则重要性（CRITIC）方法）（Brodny与Tutak，2023年；Wang等人，2022年）无需人类判断，可直接根据备选方案-准则矩阵（ACM）推导权重。作为纯数据驱动方法，这些方法不纳入专家知识或情境优先事项，因此可能忽略有价值的主观见解。

3. 方法论

本研究的方法论遵循一个结构清晰且灵活适用的决策分析框架，如图1所示的流程图所示。该框架适用于许多需要依据多个准则对备选方案进行评估和排序的决策问题。

在本研究中，我们针对可再生能源评估对该框架进行了专门调整，如图1所示。该流程首先构建 ACM，以衡量各备选方案（如太阳能和风能）在相关能源特定准则（如技术和环境准则）及其子准则方面的表现。ACM 为分析奠定了基础。随后，采用所提出的 SOMIT方法来确定各项准则的相对重要性（即权重）。默认情况下，SOMIT是一种混合方法，结合了主观权重和客观权重；不过，在该框架中也可以单独采用其中任一类权重。SOMIT仅需进行线性数量的两两比较，从而减轻认知负担；同时，它融入数据驱动洞见，增强了可靠性。最终得到一组均衡且因情境而异的权重，兼顾专家判断与实证证据。随后，将这些准则权重纳入一种或多种多准则决策方法，例如Hwang和Yoon（1981）提出的逼近理想解排序法、Stević等人（2020）提出的MARCOS（基于折衷解的备选方案测量与排序），以及 Wang等人（2021）创建的PROBID（基于理想—平均距离的偏好排序），以评估备选方案，并为可再生能源规划和政策制定提供参考。这一过程将为表现最佳的备选方案提供透明的推荐结果。

该框架具有模块化、可解释且高效的特点。通过结合专家知识与结构化数据分析，该方法论为复杂的多准则决策问题提供全面而稳健的基础。与仅依赖专家意见（如层次分析法）或仅依赖备选方案-准则矩阵（ACM）自身统计离散度（如 CRITIC）的传统方法不同，SOMIT 实现了平衡的整合。此外，采用中位数可增强对离群值的稳健性，确保最终权重更准确地反映共识观点，同时以客观的 ACM 数据为依据。这在可再生能源规划中尤为重要，因为评估标准往往涉及成本、温室气体排放、土地利用和社会接受度等相互冲突的视角。尽管 SOMIT 可推广至多个领域，但本研究明确将其用于可再生能源评估，确保权重确定过程体现碳中和、能源规划和可持续技术采用方面的应用能源关切。

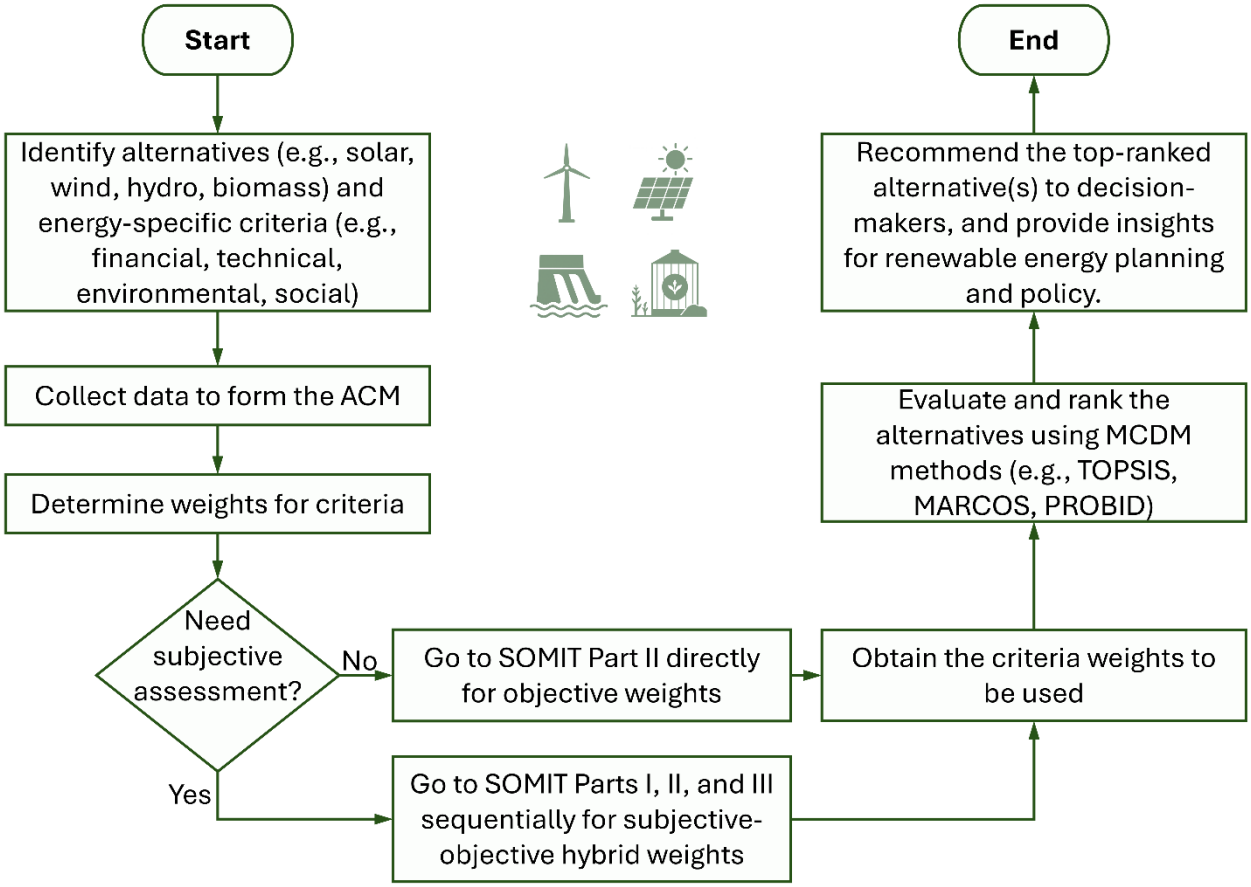


图1. 整合 ACM 构建、SOMIT 权重计算和多准则决策排序的可再生能源评估决策分析框架流程图。

3.1. 主客观中位数重要性技术（SOMIT）

本研究提出一种用于确定准则权重的新型混合方法 SOMIT，该方法分为三个部分。第一部分中，决策者使用 1–9 比较尺度对准则的相对重要性进行主观评估，以得出体现专家判断的主观权重。这一部分仅需进行 n 次比较，其中n 为准则数量。第二部分是直接根据备选方案-准则矩阵（ACM）计算客观权重。此过程无需决策者直接参与，仅依据各备选方案在各项准则上的绩效数据。第三部分采用乘法合成法整合主观权重与客观权重，从而平衡呈现专家判断与数据驱动的证据，得出准则的最终权重。
SOMIT 的主要优势在于，只需进行 n 次两两比较，便可减轻决策者的认知负担；相比之下，传统方法通常需要数量级为 n^2 次的比较，才能构建完整的两两比较矩阵。
SOMIT 对

ACM 中的离群值，并通过整合决策者的主观判断与来自 ACM 的客观数据驱动洞见，促进一致性与平衡，从而降低仅使用主观权重或客观权重所带来的偏差风险。SOMIT 易于与各种应用中的多种多准则决策方法结合使用。为便于实际应用该方法，我们开发了开源 Python 库 pysomit。SOMIT 分为以下三个部分。

SOMIT 第一部分： 仅依据决策者的评估推导主观权重 **t**

假设决策者正在评估总计 n 个准则，以主观确定每个准则的重要性（即权重）。值得一提的是，SOMIT 第一部分仅依据决策者对准则本身的评估，不考虑备选方案。

步骤 1： 决策者首先确定一个准则，根据其主观判断，该准则相较于其他准则的重要性处于中位或中等水平（即既非特别重要，也非不重要）。该中位准则记为 C_d，其中 $d \in \{1,2,\dots,n\}$。

步骤 2： 随后，使用广泛采用的两两比较九点评分尺度，将其他每个准则（C_i，其中 $i \in \{1,2,\dots,n\}$ 且 $i \neq d$）与中位准则（C_d）进行比较，如表1所示。每次比较都反映准则 C_i 相对于 C_d 的重要性。该比较值表示为 a_{id}。

例如，如果决策者认为准则 C_i 比 C_d 重要一些，则比较值为 $a_{id} = 3$。这也可以解释为：C_i 的重要性是 C_d 的三倍；反过来说，C_d 被认为只有 C_i 的三分之一重要，即 $a_{di} = 1/3$。

需要注意的是，由于此步骤中的所有比较均以中位准则为参照，通常预期决策者会将大约一半的准则评为比C_d 更重要（即$a_{id} \geq 1$，处于范围[1, 9]内），另一半评为不如其重要（即$a_{id} \leq 1$，处于范围[1/9, 1]内）。然而，在此步骤中，这种“各占一半”的分布只是宽松的指导原则，而非严格约束。鉴于这一过程中的人类判断具有主观性，允许存在一定程度的偏差或不一致性。

表1. 成对比较尺度。

尺度	在准则 C_i 和 C_j 之间进行比较
1	C_i 与C_j同等**重要**
3	C_i 比 C_j稍微**重要**
5	C_i 比 C_j明显**重要**
7	C_i 比**更**重要得多 C_j
9	C_i 比**更**重要得多 C_j
1/3	C_i 比**不那么**重要 C_j
1/5	C_i 比**不那么**重要得多 C_j
1/7	C_i 比**不那么**重要得多 C_j
1/9	C_i 比**不那么**重要得多 C_j
2、4、6、8、 1/2, 1/4, 1/6, 1/8	允许；表示相邻标度之间的中间值 如上所示
任意小数值 在 [1/9, 9], 范围内 例如，0.21 和 3.5	允许；表示更精细的比较尺度

步骤3： 确定步骤2中相对于C_d 具有最高和最低比较值的准则，分别记为C_h （最高）和C_l （最低），其中 $\mathrm{h}, l \in \{1,2,\dots,n\}$。然后，决策者使用表1所提供的相同比较尺度，直接评估C_h 相对于C_l 的重要性，记为a_{hl}。

我们特意单独选出 C_h 和 C_l 准则，要求决策者在二者之间再进行一次直接比较。主要原因在于，这两个准则处于主观权重分布的极端位置，而后续的多准则决策过程对它们尤其敏感。这两个准则的相对重要性实际上限定了所有其他权重的可行范围，因此充当整个主观赋权方案的“闸门”。通过要求决策者直接比较二者并给出 a_{hl} 值，我们建立了有力的上界和下界锚点。如果这些锚点与步骤2中的间接比较存在明显冲突，就会在随后的步骤4约束优化中暴露出不一致性。

步骤4： 理想情况下，对于所有n 准则，当i、 $j \in \{1,2,\dots,n\}$时，应确定任意两个准则（w_i^s、 w_j^s）的主观权重，使两两比较值a_{ij} （即，

准则C_i 相对于C_j的重要性）恰好等于其权重之比，w_i^s/w_j^s （该比值本质上也反映了C_i 相对于C_j的重要程度）。数学上，这一理想情形表示为：$a_{ij} = w_i^s/w_j^s$，或等价地表示为：$a_{ij}w_j^s = w_i^s$，其中 w_i^s 和 w_j^s 中的上标（s）表示这些权重源自主观评估。

然而，人类决策者进行的两两比较具有内在的主观性，并且通常带有一定程度的模糊性或不一致性。例如，如果一名决策者认为C_1 比C_2重要两倍，且认为C_2 比C_3重要四倍，那么按照逻辑，C_1 应比C_3重要八倍。这一逻辑条件称为传递性，即对于所有i、j、 $k \in \{1,2, \dots, n\}$，$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$。尽管理想情况下应如此，但人们认识到，由于认知偏差、主观性和/或无意中的不一致性，人类判断可能并不严格遵循这一性质。

因此，在步骤4中构建以下约束优化问题，旨在使偏离理想情形的程度最小化。

最小化 $$z = \sum_{(i,j)\in\mathcal{A}} \left(a_{ij}w_j^s - w_i^s\right)^2 \quad (1)$$

其中，$\mathcal{A}$ 是所有二元组（i， j）的集合，其中a_{ij} 已在步骤2或3中被赋予两两比较值。

Subject to $$\sum_{j=1}^{n} w_j^s = 1, \qquad \text{where } 0 \le w_j^s \le 1 \quad (2)$$

这个问题可以使用拉格朗日乘数法（Bertsekas，1982年）手动求解，该方法会将其转化为一个线性方程组。求解该方程组即可得到结果，即一组主观权重 $\{w_1^s, w_2^s, \dots, w_n^s\}$。

拉格朗日乘数法通过将约束优化转化为无约束优化来解决问题。为了求出满足等式约束 $g = 0$ 的标量目标函数 z 的极值，我们引入一个乘子 α，并构造拉格朗日函数 $L = z - \alpha g$。在任何满足约束的最优点处，底层变量的无穷小变化必须使 z 在一阶上保持不变，并使 $g = 0$ 得到满足；在代数上，这通过要求拉格朗日函数的所有一阶导数同时为零来实现。用符号表示为：

$$\nabla z - \alpha \nabla g = \mathbf{0}, \qquad g = 0 \quad (3)$$

求解这些条件可得到候选点，在这些点处，z 的等高线与由 g 定义的约束流形相切，从而确保任何可行偏离都不会在一阶上使 z 增大或减小。乘子 α 还提供了敏感性信息：它量化了约束每放宽一个单位时，函数 z 的最优值将发生多大变化。

此外，也可以借助 Microsoft Excel 求解器、Python、MATLAB 或其他能够处理约束优化问题的软件来求解该约束优化问题。SOMIT 第一部分的一个优点是，决策者只需进行 n 次比较，即可确定n 准则的主观权重，与传统的层次分析法相比，大幅降低了认知负担。

SOMIT 第二部分： 从备选方案-准则矩阵（ACM）推导客观权重

在继续介绍 SOMIT 第二部分之前，有必要澄清“客观权重”这一术语的用法。在此语境中，“客观”是一个形容词，表示权重不受个人或主观判断的影响。切勿将其与多目标优化（MOO）问题语境中的名词“目标”混淆（Qi 等人，2017年；Su 等人，2023年；Terada 等人，2025年），后者通常指目标或指标。建立 ACM 后，这些权重完全根据 ACM 中包含的数据推导得出，不受个人偏好或意见的影响。

步骤 5： 对具有 m 行（备选方案）和 n 列（准则）的 ACM 应用最大-最小归一化。请注意，在 SOMIT 的第二部分和第三部分中，行索引和列索引（即 i 和 j）始终满足 $i \in \{1,2,\dots,m\}$ 和 $j \in \{1,2,\dots,n\}$。

$$F_{ij} = \frac{f_{ij} - \min\limits_{k\in\{1,2,\dots,m\}} f_{kj}}{\max\limits_{k\in\{1,2,\dots,m\}} f_{kj} - \min\limits_{k\in\{1,2,\dots,m\}} f_{kj}} \tag{4}$$

其中 f_{ij} 是原始 ACM 中 i^{th} 备选方案在 j^{th} 准则（即 C_j）下的取值，而 F_{ij} 是相应的归一化值 （位于归一化备选方案-准则矩阵中）。最大-最小归一化在将所有准则的值转换到 0 到 1 的共同尺度时，可以保留每个准则的相对离散度。

步骤 6： 求出每个归一化准则的中位数（即归一化备选方案-准则矩阵中的每一列），然后计算每个准则的平均绝对中位差（AADM）。该 AADM 值记为 r_j，用于量化准则 C_j 的离散程度。

$$r_j = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} \left| F_{ij} - \tilde{F}_j \right| \tag{5}$$

其中，$\tilde{F}_j = \text{median}(F_{1j}, F_{2j}, \ldots, F_{mj})$ 是所有 m 备选方案中归一化 C_j 的中位数。

步骤7： 通过对每项准则的r_j 值进行归一化，计算其客观权重w_j^o ；其中，w_j^o 中的上标（o）表示这些权重是根据 ACM 客观得出的。

$$w_j^o = \frac{r_j}{\sum_{k=1}^{n} r_k} \tag{6}$$

一般而言，在各备选方案之间差异较大的准则被认为包含更多信息，因此会被赋予更高的权重。其基本原理是，准则的离散程度越大，就越能区分各备选方案。换言之，数值聚集得较为紧密的准则对区分备选方案的作用有限，而取值范围较广的准则则能更清楚地展现性能差异。完成此步骤后，即可得到客观权重集合：$\{w_1^o, w_2^o, \ldots, w_n^o\}$。

在 SOMIT 第二部分中，我们以中位数作为参考水平来计算每项准则的 AADM 值，因为中位数是衡量集中趋势的稳健指标，不受极端离群值或偏态分布的影响。以这个不易受极端值影响的中心值为基准衡量离散程度，可以反映准则的典型离散程度，而不会因少数异常备选方案而被夸大，从而得出更稳定、更能代表大部分数据的权重。这种稳健性在多准则情境中特别有用，因为某些备选方案可能具有异常高或低的数值；同时，它也符合决策分析目标，即避免单个异常数据项扭曲整体赋权方案。

SOMIT 第三部分：整合主观权重与客观权重，得出最终权重 **ts**

步骤 8： 最后一步是整合主观权重与客观权重，计算每项准则的最终权重 w_j ，如下所示：

$$w_j = \frac{w_j^s \cdot w_j^o}{\sum_{k=1}^{n} (w_k^s \cdot w_k^o)} \tag{7}$$

值得注意的是，SOMIT 采用模块化设计，旨在让决策者能够灵活选择在后续的多准则决策过程中使用第一部分得出的主观权重、第二部分得出的客观权重，或第三部分得出的组合权重。虽然这一选择由决策者自行决定，但通常建议使用组合权重，因为它兼顾了决策者的主观评估以及 ACM 提供的客观数据驱动洞见。

为了便于应用 SOMIT方法，我们开发了一个易于使用的 Python库，名为 pysomit，可通过 Python包索引获取

（https://pypi.org/）。用户可以使用标准的 pip 命令轻松安装该库（pipinstall pysomit），如图2所示。

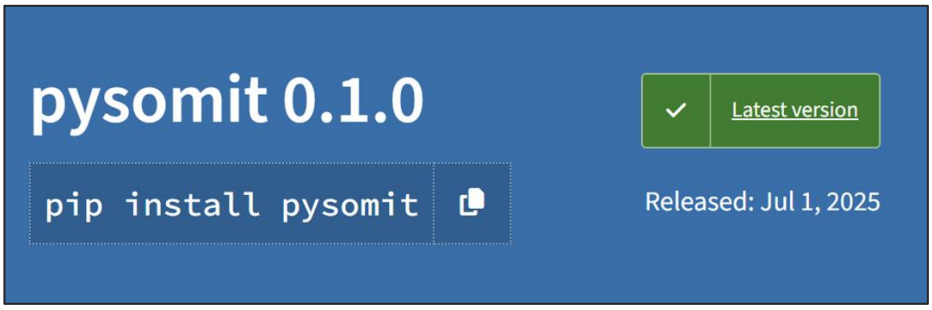
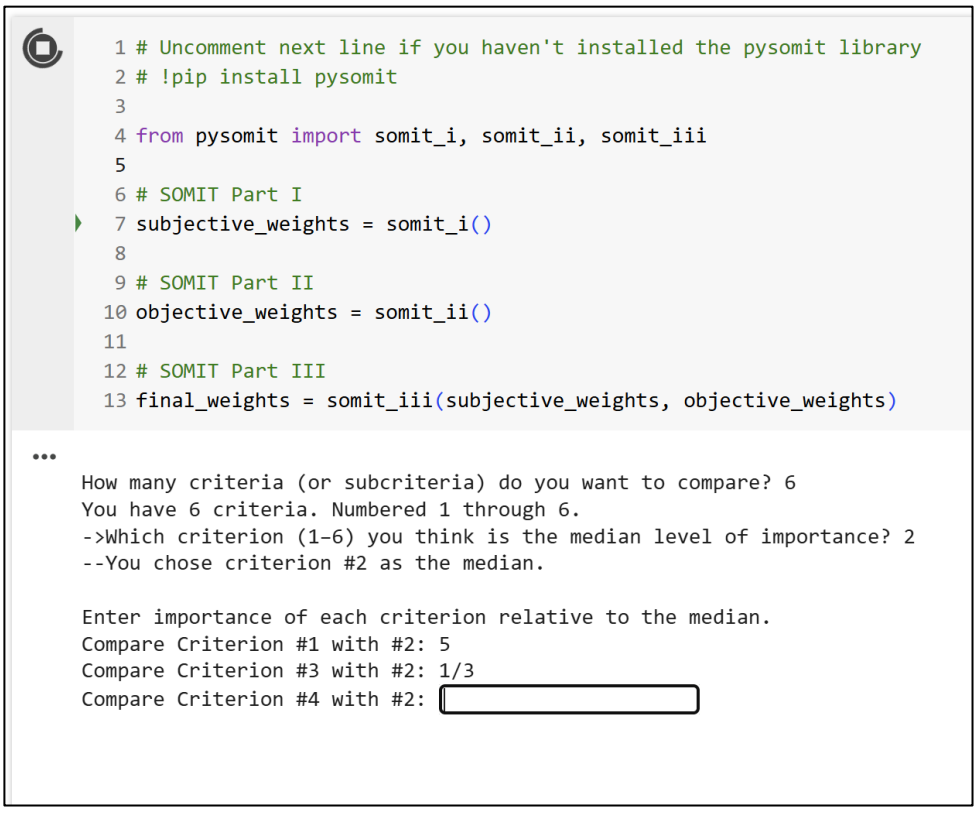


图2. pysomit 库（版本 0.1.0）托管于标准 Python 包索引（PyPI）仓库中的截图（https://pypi.org/project/pysomit/），以及使用 pip 安装的命令。

对于不熟悉 Python 的决策者而言，开始使用这一强大工具最便捷的方式之一是通过 Google Colaboratory（https://colab.google/）。用户只需在其中打开一个新笔记本，即可轻松运行 Python 代码，安装并使用 pysomit 库中的函数。如图3所示，pysomit 提供了交互式提示，引导用户完成输入 SOMIT 第一部分所需主观评估的流程。



```
# Uncomment next line if you haven't installed the pysomit library
# !pip install pysomit

from pysomit import somit_i, somit_ii, somit_iii

# SOMIT Part I
subjective_weights = somit_i()

# SOMIT Part II
objective_weights = somit_ii()

# SOMIT Part III
final_weights = somit_iii(subjective_weights, objective_weights)
```

```
How many criteria (or subcriteria) do you want to compare? 6
You have 6 criteria. Numbered 1 through 6.
->Which criterion (1-6) you think is the median level of importance? 2
--You chose criterion #2 as the median.

Enter importance of each criterion relative to the median.
Compare Criterion #1 with #2: 5
Compare Criterion #3 with #2: 1/3
Compare Criterion #4 with #2:
```

图3. 展示 pysomit 库安装与运行的 Python 代码片段截图。

此外，对于更习惯使用 Excel 的用户，我们准备了一个用于执行 SOMIT 计算的电子表格模板。该模板使用 Excel 内置的 Solver 工具求解 SOMIT 第一部分中的约束优化问题，并在第二和第三部分中使用标准 Excel 函数。pysomit Python 库和 Excel 电子表格模板均为开源资源，所有用户均可免费使用。

3.2. 逼近理想解排序法（TOPSIS）

TOPSIS方法是一种多准则决策方法，由Hwang和Yoon（1981年）最初提出，旨在根据多个（通常相互冲突的）准则对备选方案进行评估和排序。TOPSIS是应用最广泛的多准则决策方法之一（Pandey 等人，2023年）。例如，Guo和Zhao（2015）采用TOPSIS对电动汽车充电站进行排序，并根据环境、经济和社会准则选出最优方案。Elkadeem 等人（2021年）通过比较多个电气化备选方案，并考虑12项性能准则，使用TOPSIS评估并选出最可持续的能源获取方案。Zhao 等人（2025年）采用TOPSIS方法，在考虑能源效率、火用效率、经济性和环境表现的基础上，为可再生能源发电系统选择最佳负荷调节方案。

本质上，TOPSIS方法基于这样一项核心原则：最受青睐的备选方案，是与正理想解（PIS）距离最近、与负理想解（NIS）距离最远的方案（Nabavi等，2024年）。正理想解表示每项准则的最优值，即对于最大化准则取最高值，对于最小化准则取最低值。相反，负理想解由最不理想的值构成（对于最大化准则取最低值，对于最小化准则取最高值）。图4展示了一个简单示例，其中包含考虑两项准则（分别为一项最大化准则和一项最小化准则）的五个备选方案，以及理想解、负理想解和正理想解。

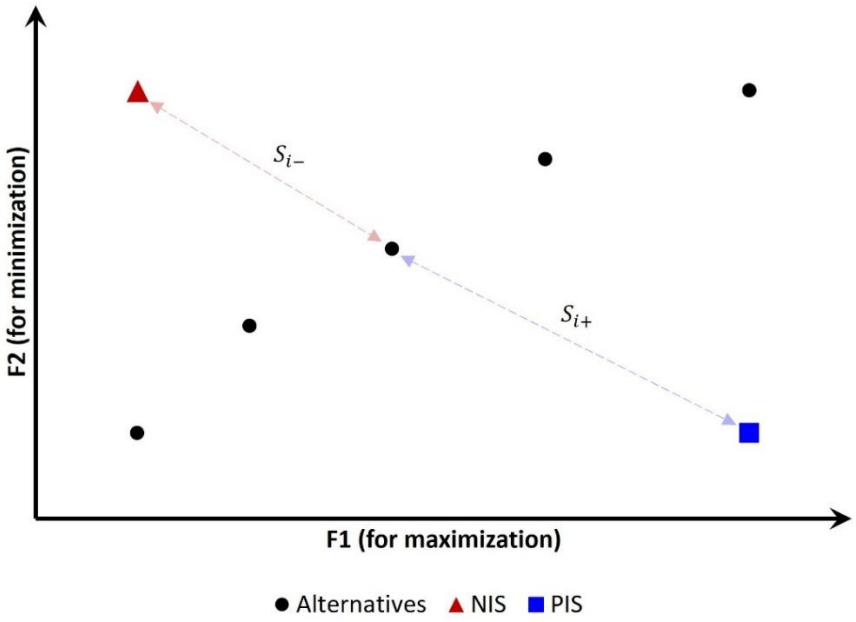


图4. 五个备选方案的简单示意图，考虑两个准则（用于最大化的F1和用于最小化的F2），以及理想解、负理想解和正理想解。

以下概述TOPSIS方法的关键步骤；原始表述和讨论请参见Hwang和Yoon（1981年）。

步骤1：使用向量归一化法对具有m行（即备选方案）和n列（即准则）的原始ACM进行归一化，如Hwang和Yoon（1981年）所述。值得注意的是，在逼近理想解排序法的所有步骤中，行索引和列索引（即i和j）满足$i \in \{1,2,\dots,m\}$和$j \in \{1,2,\dots,n\}$。

$$F_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} {f_{kj}}^2}} \tag{8}$$

其中f_{ij}和f_{kj}分别是原始ACM中i^{th}和k^{th}备选方案在j^{th}准则下的值；F_{ij}是归一化备选方案-准则矩阵中相应的归一化值。

步骤2：将每个准则的值与其权重w_j相乘，构建加权归一化ACM。在本研究中，权重使用SOMIT方法确定。

$$v_{ij} = F_{ij} \times w_j \tag{9}$$

步骤3. 根据加权归一化ACM，确定正理想解（PIS）、A^+和负理想解（NIS），A^-如下：

$$\begin{aligned} A^+ &= \left\{ \left(\max_i (v_{ij}) \,\middle|\, j \in J_{max} \right), \left(\min_i (v_{ij}) \,\middle|\, j \in J_{min} \right) \right\} \\ &= \left\{ v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_n^+ \right\} \end{aligned} \tag{10}$$

$$A^- = \left\{\left(\min_i(v_{ij}) \middle| j \in J_{max}\right), \left(\max_i(v_{ij}) \middle| j \in J_{min}\right)\right\} = \left\{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\right\} \tag{11}$$

其中 J_{max} 是最大化准则的集合，J_{min} 是最小化准则的集合。

步骤4. 分别计算每个备选方案与正理想解和负理想解之间的欧几里得距离。

$$Distance\ to\ PIS: S_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \tag{12}$$

$$Distance\ to\ NIS: S_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}\left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \tag{13}$$

步骤5. 按如下方式计算每个备选方案的绩效得分（P_i）：

$$P_i = \frac{S_{i-}}{S_{i-} + S_{i+}} \tag{14}$$

最后，P_i 最大的备选方案排名最高，并推荐给决策者。

为简化TOPSIS方法的实施并免去手动计算，Pereira等人（2024年）近期开发了用于多准则决策（MCDM）的pyDecision Python库。该综合软件包集成了多种成熟的多准则决策方法。下一节将通过示例说明如何使用pyDecision库。此外，在我们此前的研究中（Wang和Rangaiah，2017年；Wang等人，2023年），我们还开发了基于Excel的多准则决策工具EMCDM，用途类似，专为更熟悉Excel操作的决策者设计。多年来，该工具已分享给数百名研究人员和从业者。

4. 应用

4.1. 印度可再生能源评估

印度是全球第三大能源消费国，随着人口不断增长、城市化快速推进以及经济发展，对电力的需求也日益增加。尽管该国拥有丰富的常规能源储量，如煤炭、石油和生物质能，但仍面临严重的能源短缺，化石燃料目前仍满足约80%的能源需求（国际能源署，2021年）。对不可再生能源的高度依赖引发了人们对 Sustainability 和能源安全的担忧。为此，印度正大力推动可再生能源的

增长。然而，每种可再生能源都面临独特的财务、技术、环境和社会挑战，因此很难确定最可行的可再生能源方案。这些复杂因素凸显了建立稳健的多准则决策工作流程的必要性，以指导印度可再生能源领域的投资和政策制定。在印度可再生能源发展的背景下，本节的案例研究聚焦于四种主要能源：太阳能、风能、水能和生物质能。选择这些能源是因为它们技术成熟、应用广泛，并且对该国能源结构贡献显著。本案例研究的数据取自 Husain 等人（2024年）近期发表的一项研究。

太阳能：光伏技术可将阳光直接转化为电能。印度每年接收的太阳能估计达 5,000 万亿千瓦时，大多数地区的太阳辐照度为每天每平方米 4 至 7 千瓦时。由于日照充足，该国拥有巨大的太阳能潜力，估计约为 748 吉瓦（Husain 等人，2024年）。该国已安装约 60.8 吉瓦的太阳能装机容量，成为全球太阳能市场增长最快的国家之一。

风能：风能通过风力涡轮机利用空气流动的动能。该国的风能装机容量为 41.6 吉瓦，位居全球第四。评估估计，印度在 100 米和 120 米高度处的风能潜力分别为 302 吉瓦和 695.5 吉瓦（Husain 等人，2024年）。目前的开发主要集中在陆上（这需要占用宝贵的土地资源，而土地资源正日益成为重要制约因素），但该国还有大量尚待开发的海上风能潜力。

水力发电：这种能源通过引导流水流经涡轮机来发电，约占印度总发电量的 11.5%。印度的大型和小型水电装机容量合计超过 50 吉瓦，是全球主要的水力发电国家之一，但环境和社会方面的担忧对其扩张构成了挑战。

生物质能：生物质能来源于农业残余物和动物粪便等有机物质，既包括传统方式（如燃烧木材、粪便和木炭），也包括现代技术（如沼气和液体生物燃料）。印度的生物质发电装机容量为 10.2 吉瓦；由于每年可获得超过 7.5 亿公吨的生物质，其发展潜力巨大（Husain 等人，2024年）。生物质能的分散式特性及其创造农村就业的潜力，使其对印度的能源格局尤为重要。

为有效评估可再生能源，本案例研究考虑了四个主要准则组，即财务、技术、环境和社会，每组包含两个或更多准则。

财务：该组包括与经济投资和运营直接相关的因素。主要准则有以下三项。总安装成本（$/kW）：购买和安装能源系统所需的资本；运营与维护成本（$/kW/y）：用于计划内和计划外维护、人员配置及资产管理的持续支出。平准化度电成本（LCOE），即平准化度电成本（$/kWh）：表示能源系统在其使用寿命期间每单位发电量的平均成本，并计入资本和运营成本。

技术：这些准则用于评估各类能源技术的功能和性能。三项关键准则如下。 效率（%）：输入能量转化为可用电力的百分比，是系统规划中的关键因素。容量因子（%）：系统在一段时间内实际能源产出占最大潜在产出的百分比。技术成熟度（无量纲）：采用 1 至 5 分制进行评定的定性指标，其中 1 表示成熟度最低，5 表示最高。该评分由领域专家给出，反映能源技术在当前市场中的发展完善程度及经过验证的程度。

环境：该组评估各类能源的生态影响。两项关键准则如下。温室气体排放（gCO_2/kWh）：该技术在整个生命周期内排放的温室气体量。研究表明，可再生能源的生产、安装和使用都存在隐含的碳足迹（de Souza Grilo 等人，2018）。土地需求（m^2/kW）：部署所需的土地面积，这在印度等人口稠密地区是一个重要问题。

社会：该组涉及可再生能源系统的社会影响及其社会接受度：就业创造（人年/GWh）：一项技术在建设和运营阶段创造就业机会的能力。社会接受度：根据调查答复，采用 1–5 的定性量表进行评估，其中 1 表示公众强烈反对，5 表示公众强烈支持。这反映了公众对该技术的总体看法和支持程度。

此外，如表2所示，效率、容量因子、技术成熟度、就业创造和社会接受度属于效益型准则，即需要最大化，数值越高表示结果越有利。相比之下，总安装成本、运维成本、平准化度电成本、温室气体排放和土地需求属于成本型准则，即需要最小化，数值越低越理想。

Tab表 2. 印度可再生能源选择案例研究中考虑的十项准则 .

准则组	准则名称（单位）	准则 Code	Type
财务	总安装成本（美元/kW）	C1	Cost
	运维成本（$/kW/y）	C2	Cost
	平准化度电成本（$/kWh）	C3	Cost
技术	效率（%）	C4	收益
	容量因子（%）	C5	收益
	技术成熟度	C6	收益
环境	温室气体排放（gCO_2/kWh）	C7	Cost
	土地需求（m^2/kW）	C8	Cost
社会	就业创造（人年/GWh）	C9	收益
	社会接受度	C10	收益

Husain 等人（2024）广泛回顾了相关文献，并从众多可信来源收集数据，构建了表3所示的 ACM。总共有四种备选方案和十项准则。总安装成本、运维成本、效率和土地需求等准则的定量数据取自现有学术出版物、技术报告和政府数据库。除基于文献的数据外，作者还通过直接方法收集了定性信息：技术成熟度依据专家判断按 1–5 分进行评估；社会接受度则通过面向公众开展的问卷调查进行评估，同样采用 5 分制。

表3. 印度可再生能源选择的备选方案-准则矩阵（ACM）。

	财务			技术			环境		社会	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
太阳能	596	9	0.038	22	19	4	48	12	0.87	4.58
Wind	1038	28	0.04	35	33	4	11	250	0.17	4.17
水能	1817	45.425	0.065	76.61	57	5	24	500	0.27	3.56
生物质能	1154	46.16	0.057	84.33	68	3	230	13	0.21	4

获得ACM后，首先应用所提出的SOMIT方法确定各准则的权重。随后，采用TOPSIS方法，使用通过SOMIT得到的权重，综合考虑全部十项准则，对四个备选方案进行评估和排序。

由于本案例研究考虑了四个准则组（即财务组、技术组、环境组和社会组），我们首先应用 SOMIT 第一部分的步骤，评估并计算分配给各组的主观权重。我们使用 W_1^s （大写形式）表示财务组的主观权重，W_2^s 表示技术组的主观权重，W_3^s 表示环境组的主观权重，

以及 W_4^s 表示社会组的主观权重。随后，将这些组层级的权重分配给各组内的单个准则。

在四个准则组中，决策者选择环境组作为重要性处于中位水平的组。随后，使用表1所述的 1–9 标度，将其余各准则组分别与环境组进行比较。主观评估如下：决策者认为，财务相较于环境的重要性介于中等偏高和强烈偏高之间，因此 $a_{13}=4$；技术相较于环境的重要性为中等偏高，因此 $a_{23}=3$；社会相较于环境的重要性介于同等重要和中等偏低之间，因此 $a_{43}=1/2$。在与环境组的比较中，财务的比较值最高，而社会的比较值最低。随后，决策者直接比较财务与社会，并判断财务相较于社会的重要性介于同等重要和中等偏高之间，因此得到 $a_{14}=2$。

根据这四个比较值（即 $a_{13}=4, a_{23}=3, a_{43}=1/2, a_{14}=2$），可将带有等式约束的优化问题表述如下：

$$\begin{aligned}\text{Min}\quad & z=(a_{13}W_3^s-W_1^s)^2+(a_{23}W_3^s-W_2^s)^2+(a_{43}W_3^s-W_4^s)^2+(a_{14}W_4^s-W_1^s)^2\\ &=(4W_3^s-W_1^s)^2+(3W_3^s-W_2^s)^2+\left(\frac{1}{2}W_3^s-W_4^s\right)^2+(2W_4^s-W_1^s)^2\end{aligned}\tag{15}$$

满足条件 $W_1^s+W_2^s+W_3^s+W_4^s-1=0$

$$\begin{aligned}&0\le W_1^s\le 1\\ &0\le W_2^s\le 1\\ &0\le W_3^s\le 1\\ &0\le W_4^s\le 1\end{aligned}\tag{16}$$

接下来, 使用拉格朗日乘数法，求出所有一阶偏导数 s:

$$\begin{aligned}L&=z-\alpha g\\ &=(4W_3^s-W_1^s)^2+(3W_3^s-W_2^s)^2+\left(\frac{1}{2}W_3^s-W_4^s\right)^2+(2W_4^s-W_1^s)^2\\ &\quad-\alpha(W_1^s+W_2^s+W_3^s+W_4^s-1)\end{aligned}\tag{17}$$

其中，α 为拉格朗日乘子，g 表示等式约束。

$$\frac{\partial L}{\partial W_1^s}=-2(4W_3^s-W_1^s)-2(2W_4^s-W_1^s)-\alpha=0\tag{18}$$

$$\frac{\partial L}{\partial W_2^s}=2(W_2^s-3W_3^s)-\alpha=0\tag{19}$$

$$\frac{\partial L}{\partial W_3^s}=8(4W_3^s-W_1^s)+6(3W_3^s-W_2^s)+\left(\frac{1}{2}W_3^s-W_4^s\right)-\alpha=0\tag{20}$$

$$\frac{\partial L}{\partial W_4^s} = 2\left(W_4^s - \frac{1}{2}W_3^s\right) + 4(2W_4^s - W_1^s) - \alpha = 0 \tag{21}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha} = W_1^s + W_2^s + W_3^s + W_4^s - 1 = 0 \tag{22}$$

现在，我们得到一个包含五个未知数的五元线性方程组（公式 18 至 22）。手动求解该方程组可得以下数值解：财务权重为 W_1^s =0.3900；技术权重为 W_2^s = 0.3343；环境权重为 W_3^s =0.1056；社会权重为 W_4^s = 0.1701。

或者，也可以使用我们开发的 pysomit 库直接求解这一优化问题。相应的简明 Python 代码、交互式提示和最终结果如图5所示。如图所示，对于四个准则组，pysomit 库得出的主观权重与手动计算所得的主观权重相同。

```
# Uncomment next line if you haven't installed the pysomit library
# !pip install pysomit

from pysomit import somit_i, somit_ii, somit_iii

# SOMIT Part I
W_s_group = somit_i()
```

```
How many criteria (or subcriteria) do you want to compare? 4
You have 4 criteria. Numbered 1 through 4.
->Which criterion (1-4) you think is the median level of importance? 3
--You chose criterion #3 as the median.

Enter importance of each criterion relative to the median.
Compare Criterion #1 with #3: 4
Compare Criterion #2 with #3: 3
Compare Criterion #4 with #3: 1/2

Highest: criterion #1 (4.0); Lowest: criterion #4 (0.5)
Compare Criterion #1 with #4: 2
 a_hl = 2.0

Optimal subjective weights (w^s):
  w^s_1 = 0.3900
  w^s_2 = 0.3343
  w^s_3 = 0.1056
  w^s_4 = 0.1701
Objective value z = 0.017595
```

图5. 使用 pysomit 库求解 SOMIT 第一部分中所构建优化问题的 Python 代码片段截图。

随后，财务组包含三个准则：总安装成本、运维成本和平准化度电成本。对这些组内准则进行两两比较，以确定它们各自占分配给财务组的主观总权重的份额（比例）。决策者首先选择运维成本作为该组中重要性居中的准则。由于 SOMIT 灵活支持使用小数值以进行更精细的区分（如表1最后一行所示），决策者评定：总安装成本的重要性是运维成本的 1.5 倍；平准化度电成本的重要性是运维成本的 0.8 倍。鉴于总安装成本的比较值最高，而平准化度电成本的比较值最低，决策者直接比较这两个准则，并评定总安装成本的重要性是平准化度电成本的 1.3 倍。利用这些数值，可构建一个约束优化问题（类似于公式 15 和 16），并通过拉格朗日乘数法或其他适用的计算工具（例如 pysomit）求解。所得财务组内相对份额为：总安装成本：0.4135，运维成本：0.2966，平准化度电成本：0.2899。因此，将各自的份额乘以分配给该组的权重 $W_1^s = 0.3900$，即可计算出其主观权重。由此得到的主观权重如下：总安装成本：$w_1^s = 0.3900 \times 0.4135 = 0.1613$，运维成本：$w_2^s = 0.3900 \times 0.2966 = 0.1157$，平准化度电成本：$w_3^s = 0.3900 \times 0.2899 = 0.1131$。

对于其余三个准则组（技术、环境和社会），各组的主观组权重在组内准则之间平均分配。这相当于在比较准则时赋予相同的重要性（值为1）（例如，使用 pysomit 时）。所有准则的完整主观权重集列于表4第二列。

表4. 使用 SOMIT 确定的印度可再生能源选择准则权重。

准则 Code	主观 权重 w_j^s	客观 权重 w_j^o	最终 权重 w_j
C1	0.1613	0.0830	0.1335
C2	0.1157	0.1113	0.1285
C3	0.1131	0.1235	0.1393
C4	0.1114	0.1263	0.1405
C5	0.1114	0.1129	0.1255
C6	0.1114	0.0758	0.0843
C7	0.0528	0.0841	0.0443
C8	0.0528	0.1126	0.0593
C9	0.0850	0.0823	0.0698
C10	0.0850	0.0884	0.0750

接下来，按照 SOMIT 第二部分的步骤，直接根据 ACM 得出客观权重。为简洁起见，计算详情列于表5；应用公式6后，所有准则的完整客观权重汇总于表4第三列。进入 SOMIT 第三部分后，使用公式7整合主观权重和客观权重，得到最终权重，列于表4最后一列。这些权重也可以通过图6中的条形图进行可视化。

Ta表 5. 印度可再生能源选择中 SOMIT 第二部分的计算细节。

归一化备选方案-准则矩阵（使用最大-最小归一化）										
	财务			技术			环境		社会	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
太阳能	0	0	0	0	0	0.5	0.1689	0	1	1
Wind	0.3620	0.5113	0.0741	0.2086	0.2857	0.5	0	0.4877	0	0.5980
水能	1	0.9802	1	0.8761	0.7755	1	0.0594	1	0.1429	0
生物质能	0.4570	1	0.7037	1	1	0	1	0.0020	0.0571	0.4314
中位数	0.4095	0.7458	0.3889	0.5424	0.5306	0.5	0.1142	0.2449	0.1	0.5147
中位数绝对偏差（ADM）										
太阳能	0.4095	0.7458	0.3889	0.5424	0.5306	0.0000	0.0548	0.2449	0.9000	0.4853
Wind	0.0475	0.2345	0.3148	0.3338	0.2449	0.0000	0.1142	0.2428	0.1000	0.0833
水能	0.5905	0.2345	0.6111	0.3338	0.2449	0.5000	0.0548	0.7551	0.0429	0.5147
生物质能	0.0475	0.2542	0.3148	0.4576	0.4694	0.5000	0.8858	0.2428	0.0429	0.0833
AADM (r_j)	0.2738	0.3672	0.4074	0.4169	0.3724	0.2500	0.2774	0.3714	0.2714	0.2917

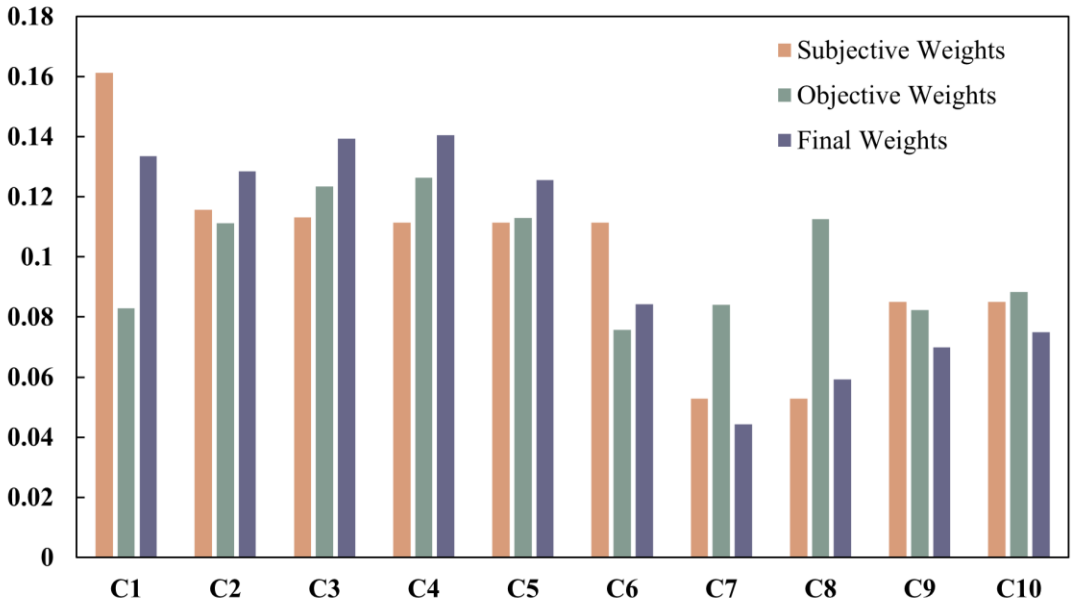


图6. SOMIT 确定的印度可再生能源选择十项准则的主观权重、客观权重和最终权重。

表 6 展示了使用我们开发的 pysomit 库，在一次运行中完成 SOMIT方法全部三个部分的完整代码（无需手动计算）。输出的主观权重、客观权重和最终组合权重显示在表 6 最后几行的注释中，位于井号（#）之后。这些生成的权重与手动计算所得结果一致。

表 6. 使用 pysomit 库查找印度可再生能源选择准则权重的完整代码。

```
# 如果尚未安装 pysomit 库，请取消下一行的注释
# !pip install pysomit

来自 pysomit 导入 somit _i, somit _ii, somit _iii
导入 NumPy 作为 np

# SOMIT 第一部分
W_s_组 = SOMIT _i()
F_分数 = SOMIT _i()
T_分数 = SOMIT _i()
E_分数 = SOMIT _i()
S_分数 = SOMIT _i()

组 = [F _分数, T _分数, E _分数, S _分数]
w_s = [W * frac 针对 W, gp 在 zip(W _s_group, groups) 针对 frac 在 gp]
w_s = np.array(w _s, dtype=浮点数)
打印("\n主观权重：", np.四舍五入(w _s,4))

# SOMIT 第二部分
ACM = np.array([
    [596,   9,     0.038, 22,    19, 4,   48,  12, 0.87, 4.58],
    [1038,  28,    0.04,  35,    33, 4,   11, 250, 0.17, 4.17],
    [1817, 45.425, 0.065, 76.61, 57, 5,   24, 500, 0.27, 3.56],
    [1154, 46.16,  0.057, 84.33, 68, 3,  230,  13, 0.21, 4.00]
])

w_o = SOMIT _ii(ACM)
打印("\n客观权重：", np.四舍五入(w _o,4))

# SOMIT 第三部分
最终 _权重 = SOMIT _iii(w _s, w_o)
打印("\n最终权重:", np.四舍五入(最终 _权重, 4))

# ---------- 输出权重 ----------
# 主观权重：[0.1613 0.1157 0.1131 0.1114 0.1114
# 0.1114 0.0528 0.0528 0.085 0.085 ]
# 客观权重：[0.083 0.1113 0.1235 0.1263 0.1129
```

```
# 0.0758 0.0841 0.1126 0.0823 0.0884]
# 最终权重：[0.1335 0.1285 0.1393 0.1405 0.1255
# 0.0843 0.0443 0.0593 0.0698 0.075 ]
# ----------------------------------------
```

接下来，使用 SOMIT 确定的最终权重，通过 TOPSIS方法对四个备选方案在全部十项准则下进行排序。按照第2.2节所述流程，加权归一化ACM以及正理想解和负理想解列于表7。请注意，此处采用向量归一化，与 Hwang和Yoon（1981年）的方法一致。值得再次强调的是，效率、容量因子、技术成熟度、就业创造和社会接受度属于最大化准则；而总安装成本、运维成本、平准化度电成本、温室气体排放和土地需求属于最小化准则。在 TOPSIS方法的步骤3中确定正理想解和负理想解时，应仔细考虑这一区别。

表7. 使用TOPSIS方法对备选方案进行排序的加权归一化ACM和理想解。

加权归一化ACM（使用向量归一化）										
	财务			技术			环境		社会	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
太阳能	0.0323	0.0163	0.0516	0.0255	0.0247	0.0415	0.0090	0.0013	0.0639	0.0420
Wind	0.0563	0.0506	0.0543	0.0406	0.0429	0.0415	0.0021	0.0265	0.0125	0.0382
水能	0.0985	0.0821	0.0883	0.0888	0.0741	0.0519	0.0045	0.0530	0.0198	0.0326
生物质能	0.0626	0.0834	0.0774	0.0978	0.0884	0.0311	0.0431	0.0014	0.0154	0.0366
理想解										
PIS	0.0323	0.0163	0.0516	0.0978	0.0884	0.0519	0.0021	0.0013	0.0639	0.0420
NIS	0.0985	0.0834	0.0883	0.0255	0.0247	0.0311	0.0431	0.0530	0.0125	0.0326

随后，计算每个备选方案与正理想解（PIS）和负理想解（NIS）之间的欧几里得距离，并分别列于表8的第二行和第三行。根据这些数值并使用公式14，计算出每个备选方案的绩效得分，结果显示在表8的最后一列。

表8. 至正理想解和负理想解的距离及性能得分

备选方案	S_{i+}	S_{i-}	P_i
太阳能	0.0971	0.1300	0.5725
Wind	0.1025	0.0842	0.4511
水能	0.1227	0.0918	0.4279
生物质能	0.1029	0.1157	0.5293

由此可见，逼近理想解排序法（TOPSIS）的结果得出以下排序：太阳能 ≻ 生物质能 ≻风能 ≻ 水能。根据全部十项准则，并采用结合主观评估与客观数据驱动洞见的SOMIT权重，该结果建议将太阳能列为印度排名最高的可再生能源替代方案。这一结果与印度更广泛的可再生能源政策格局一致：在国家太阳能使命及后续邦级倡议的推动下，太阳能已被视为清洁能源转型的支柱（Umar & Yadaw, 2024）。基于SOMIT的太阳能优先排序，不仅体现了其较低的成本（包括安装成本、运营与维护成本以及平准化度电成本），也反映出其土地需求相对适中；对于人口稠密的国家而言，这是一项显著优势。Umar与Yadaw（2024）近期发表的综述文章建议，印度应继续完善政策框架、鼓励私营部门参与，并推进研发，以充分发挥其太阳能潜力。然而与此同时，基于SOMIT的结果也凸显了一项重要的权衡。太阳能在成本和土地利用表现方面优势突出，但其温室气体排放相较于风能和水能较高。这些排放主要与上游制造过程有关，尤其是光伏组件的高能耗生产，而非运营阶段。通过呈现这一细微差异，SOMIT确保在评估环境可持续性时采取整体视角，将生命周期影响与运营效益一并纳入考量。这有助于政策制定者更清晰地了解其中的权衡，确保在快速部署太阳能的同时，采取措施减少制造环节及供应链中的隐含碳。此外，赋权阶段还纳入了社会接受度这一重要因素；该因素曾影响印度可再生能源的推广速度（Kar等，2024）。例如，公众反对土地征用以及对生物质收集物流的担忧，常常会拖慢项目实施进度，尽管这些项目在技术上具备可行性。SOMIT框架也能揭示这些敏感因素，从而推动可再生能源实现社会可接受且可持续的发展。

同样，如表9所示，通过调用 pyDecision库中的逼近理想解排序法（TOPSIS）函数，并结合 SOMIT 确定的最终权重，可得到与表8所示相同的性能得分。使用这些可靠的工具可以避免手动计算。

如图所示，尽管本例在逼近理想解排序法（TOPSIS）中采用了最终的混合权重，但 SOMIT 的模块化设计具有灵活性：根据决策者的偏好，可在多准则决策过程中单独使用主观权重或客观权重。一些决策者可能更重视自己的主观评估，而非根据 ACM 得出的权重；另一些决策者则可能倾向于完全依赖根据 ACM 计算出的客观权重，以尽量减少此阶段引入的主观性。

此外，SOMIT 权重可以无缝整合到任何将准则权重纳入算法的多准则决策方法中。从管理角度来看，在可再生能源项目评估中，SOMIT 为决策者提供了一种结构化方法，用于权衡技术、财务、环境和社会方面的因素。在印度这一案例研究中，可再生能源扩张必须兼顾可负担性与大规模部署；SOMIT 使政策制定者和能源管理者能够在对技术进行优先排序时，不仅考虑成本和效率，还考虑就业创造、社会接受度等更广泛的社会经济影响。这有助于管理者使投资决策同时符合国家可再生能源目标和发展目标。

表9. 使用 pyDecision 库中的 TOPSIS方法对印度的可再生能源进行排序的 Python 代码。

```
# 如果尚未安装 pyDecision库，请取消下一行的注释
# !pip install pyDecision

导入 NumPy 作为 np
从 pyDecision.algorithm 导入 topsis
                                    _方法

# 准则类型：收益用 'max'；成本用 'min'
类型 = ['min', 'min', 'min', 'max', 'max', 'max',
'min','min','max','max']

# 行：备选方案；列：准则
ACM = np.array([
    [596,    9,      0.038, 22, 19, 4, 48, 12, 0.87, 4.58],
    [1038,  28,     0.04,  35,    33, 4,   11, 250, 0.17, 4.17],
    [1817, 45.425, 0.065, 76.61, 57, 5,   24, 500, 0.27, 3.56],
    [1154, 46.16,  0.057, 84.33, 68, 3,  230,  13, 0.21, 4.00]
])

# 在此，取混合最终结果              _由 SOMIT 得出的权重
权重 = np.round(最终          _权重, 4)

# 使用 TOPSIS方法进行计算
性能          _得分 = topsis        _method(ACM, 权重, 类型,
                                    图=False, 详细输出=False)
print("性能得分：", np.round(performance                    _分数, 4))

# ---------- 输出 ----------
# 性能得分：[0.5725 0.4511 0.4279 0.5293]
# ------------------------------------
```

4.2. 沙特阿拉伯可再生能源评估

为进一步展示所提出的SOMIT方法在支持多准则决策方面的实用性，本节简要介绍另一项案例研究，该研究聚焦于评估沙特阿拉伯的可再生能源资源，案例取自Yazdani等人（2020）。研究对五种可再生能源——太阳能光伏（光伏）、太阳能热利用、风能、地热能和生物质能——进行评估，并依据一组涵盖技术、财务、环境和社会维度的准则进行排序。研究从现有文献中选取了八项关键准则（如下所示的C1至C8），用于指导这项决策分析。取自Yazdani等人（2020）的完整ACM数据见表10。

- C1：资本成本（美元/兆瓦）涵盖建设发电厂的所有相关费用，包括土地征用、设备采购、劳动力、安装和基础设施建设。这是一项成本准则。

- C2：运维成本（美元/千瓦年）包括人员配置、日常维护以及能源生产相关成本等经常性支出。这是一项成本准则。
- C3：能源成本（美元/kWh）反映电厂在整个运营寿命期内预计的电力生产成本。这是一项成本准则。
- C4：就业创造（总人年/GWh）衡量每种可再生能源系统每年的就业潜力。这是一项收益准则。
- C5：土地利用（m^2/GWh）量化建设和运营能源设施所需的物理空间。这是一项成本准则。
- C6：温室气体排放（tCO_2当量/MWh）表示电厂运营期间释放的有害气体量，是一项环境影响指标。这是一项成本准则。

- C7：效率（%）表示能源转化为可用电力的有效程度，以能量输出相对于输入的百分比表示。这是一项收益准则。

- C8：资源可用性（kwh/m^2/year）衡量当地可再生资源的获取程度，以及这些资源是否充足，能否支持稳定发电。这是一项收益准则。

表10. 用于评估沙特阿拉伯可再生能源的 ACM。

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
太阳能光伏	3873	39.55	0.27	0.87	150	0.07	12	2130
太阳能热利用	5067	67.26	0.23	0.23	40	0.02	21	2200
Wind	2213	24.69	0.08	0.17	200	0.04	35	570
地热能	6243	132	0.07	0.25	100	0.04	16	100
生物质能	8312	460.47	0.05	0.21	25	0.1	25	200

在本例中，首先应用SOMIT方法直接评估八项标准（不同于前一个案例研究，该研究先评估准则组，再考察各组中的单项准则）。此处将准则C3作为两两比较的中位数。主观评估如下：C1与C3 = 3比较；C2与C3 = 2比较；C4与C3 = 1比较；C5与C3 = 1/4比较；C6与C3 = 1/2比较；C7与C3 = 1比较；C8与C3 = 3比较。根据这些评估，C1的比较值最高，而C5最低。另对C1与C5进行比较，并赋值3。采用SOMIT方法得出的主观权重、客观权重和最终组合权重汇总于表11。为简洁起见，此处不展示中间计算过程，但可使用pysomit库或Excel Solver轻松复现。

表11. 使用 SOMIT 确定的用于评估沙特阿拉伯可再生能源的所有准则权重。

准则 Code	主观 权重 w_j^s	客观 权重 w_j^o	最终 权重 w_j
C1	0.2289	0.1187	0.2111
C2	0.1642	0.1036	0.1322
C3	0.0806	0.1476	0.0924
C4	0.0836	0.0904	0.0587
C5	0.0710	0.1392	0.0768
C6	0.0433	0.1175	0.0396
C7	0.0836	0.1189	0.0773
C8	0.2448	0.1640	0.3120

可以看出，对于八项标准，仅需进行八次两两比较（即与n 个准则呈线性关系）。相比之下，传统层次分析法按照$n(n-1)/2$的二次表达式，需要进行28次比较。接下来，使用SOMIT确定的最终权重，采用TOPSIS方法评估替代能源。得到的性能得分分别为：太阳能光伏0.7562、太阳能热利用0.7556、风能0.4997、地热能0.3312和生物质能0.2281。因此，

排名为：太阳能光伏 ≻ 太阳能热利用 ≻ 风能 ≻ 地热能 ≻ 生物质能。这些结果表明，同时考虑全部八项标准时，太阳能光伏是沙特阿拉伯最受青睐的可再生能源。结果也与沙特阿拉伯的愿景2030计划相符；该计划将太阳能指定为其可再生能源组合的基石，目标是实现58.7 GW的可再生能源装机容量，其中40 GW（即68.1%）预计来自太阳能（Ali等，2021年）。SOMIT通过在稳健的多准则决策框架中确认太阳能光伏和太阳能热利用的主导地位，为沙特阿拉伯可再生能源格局中持续推进的能源政策与决策提供了更坚实的分析依据。同时，基于SOMIT的结果也凸显了地热能和生物质能等备选方案在此情境下排名较低的原因（分别位列倒数第二和最后）。沙特阿拉伯的地热资源分布有限，且无法在大规模应用时具备成本竞争力；而在干旱地区，生物质能则受到资源可用性和长期可持续性的限制。这些劣势在多准则决策加权与评估过程中得到了清晰体现，也解释了它们在当前政策规划中的边缘地位。通过揭示这些情况，所提出的框架不仅证实了太阳能的适用性，也展示了在当地资源条件下，除太阳能和风能之外实现可再生能源结构多元化所面临的挑战。值得注意的是，预计太阳能和风能将占沙特阿拉伯目标可再生能源装机容量的95.4%。SOMIT的管理意义在于，它能够为国家在雄心勃勃的能源转型与多元化议程下的决策提供指导。SOMIT帮助能源规划者权衡可再生能源的环境效益与经济竞争力和能源安全的需求，从而提供一个透明的框架，向利益相关方说明技术优先级排序的依据。展望未来，公用事业和各部委的管理者可以进一步应用SOMIT，微调最优技术组合（例如，随着技术发展和条件变化调整可再生能源的配置），使其在愿景2030计划下兼顾总体碳中和目标与经济多元化战略。

5. 讨论与比较

为便于比较，我们还采用广泛使用的层次分析法，为印度可再生能源评估案例研究中的十项准则确定权重。与第4.1节一样，我们首先确定四个准则组（财务、技术、环境和社会）的权重，然后按照与 SOMIT 第一部分一致的方式，将组权重进一步分配给各自包含的准则。表12列出了层次分析法所用四个准则组的完整两两比较矩阵。如表所示，

环境列中的比较值沿用了第4.1节的设置，其中环境组被视为重要性处于中位水平。同样，财务组与社会组之间的比较值也保留在层次分析法矩阵中。

表12. 使用层次分析法对印度可再生能源选择的四个准则组进行的完整两两比较矩阵。

准则组	财务	技术	环境	社会
财务	1	2	4	2
技术	1/2	1	3	5
环境	1/4	1/3	1	2
社会	1/2	1/5	1/2	1

借助 Python NumPy库，采用原始特征值法求解层次分析法问题，得到的组权重如下：财务 $W_1^s = 0.4257$，技术 $W_2^s = 0.3401$，环境 $W_3^s = 0.1297$，社会 $W_4^s = 0.1045$。在财务组内，采用 SOMIT 第一部分中的相同内部比较，并使用层次分析法求解，得出总安装成本、运维成本和平准化度电成本的相对占比分别为 0.4108、0.3095 和 0.2797。因此，将各自的相对占比乘以财务组权重，即可计算出它们的权重。对于其余三个准则组（技术、环境和社会），与 SOMIT 第一部分一样，将各组的权重平均分配给组内各项准则。十项准则的完整层次分析法权重为：C1：0.1749，C2：0.1318，C3：0.1191，C4：0.1134，C5：0.1134，C6：0.1134，C7：0.0649，C8：0.0649，C9：0.0523，C10：0.0523。与表4第二列所示的 SOMIT 主观权重相比，这些层次分析法权重的差异并不大。其皮尔逊相关系数为 0.898，进一步印证了这种一致性，表明两组主观权重之间存在很强的正相关关系。

然而，正如前文简要指出的，传统层次分析法需要进行$n(n-1)/2$次两两比较，才能构建完整的比较矩阵，其中n为准则数量。随着n增加，这种二次增长很快就会给决策者带来沉重负担。相比之下，所提出的SOMIT方法只需决策者总共进行n次主观比较，就能够得出相当的权重。图7清楚地展示了这一差异：层次分析法呈二次增长，而SOMIT呈线性增长。因此，在很大程度上保留主观权重质量的同时，SOMIT

显著减轻了决策者的认知负荷，尤其是在涉及许多准则（例如六个以上）的常见能源系统多准则决策应用中。

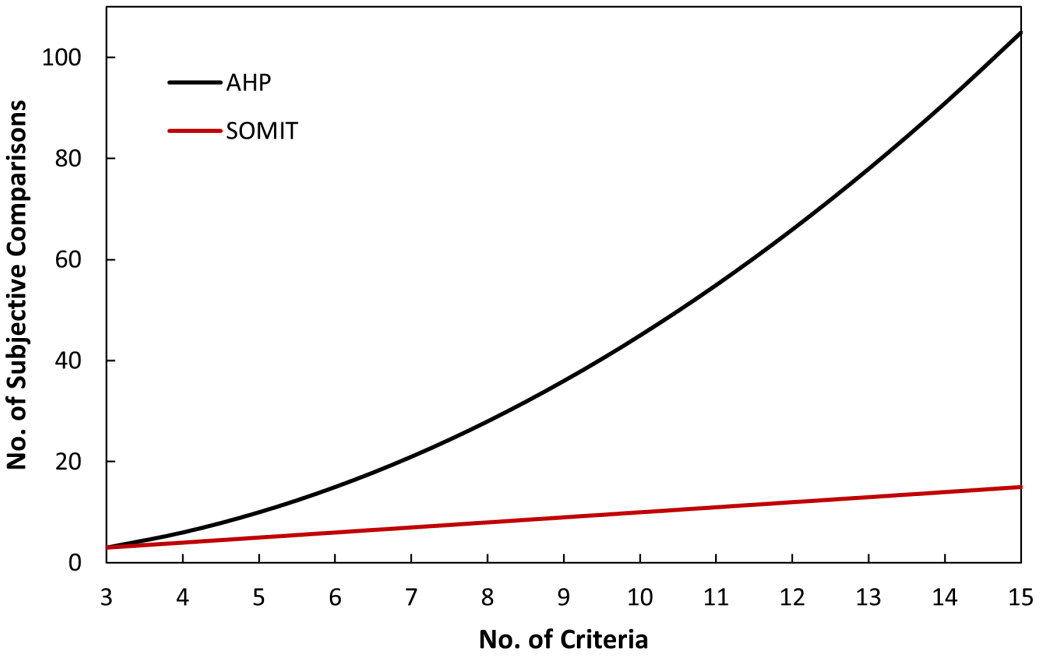


图7. 层次分析法和 SOMIT 方法所需的主观成对比较数量。

接下来，我们评估 SOMIT 第二部分（根据 ACM 得出客观权重）和广泛采用的客观赋权法 CRITIC 在 ACM 中出现极端离群值时的表现。由于测量误差、数据收集或处理问题，以及数据录入或记录错误等多种原因，ACM 中可能会出现离群值。为作说明，我们再次以印度可再生能源评估案例研究为例，假设太阳能的 CO_2 排放被错误地记录为 480 gCO_2/kWh，而正确值应为 48 gCO_2/kWh。值得注意的是，太阳能在整个生命周期中每千瓦时排放 480 gCO_2并不现实；据报告，平均值为 49.91 gCO_2/kWh（Nugent & Sovacool, 2014）。因此，这一错误显然构成了 ACM 中的离群值。随后，我们评估该离群值的存在会如何影响 SOMIT 第二部分和 CRITIC 确定的客观准则权重。如图8所示，CRITIC 受这一极端值的影响更大，而 SOMIT 第二部分受到的影响相对较小。这一差异源于两者的基本原理：SOMIT 第二部分在计算中采用中位数，因此天然具有更强的抗离群值能力；而 CRITIC 依赖算术平均数来衡量准则离散度和成对相关性，因此更容易受到极端值的扭曲。除了所需主观比较更少、稳健性更强之外，

SOMIT 的另一项优势是，其第三部分始终致力于通过结合决策者的主观权重与基于 ACM 客观数据驱动的权重，提升一致性与平衡性，从而减少仅依赖主观或客观赋权方法所可能造成的偏差。

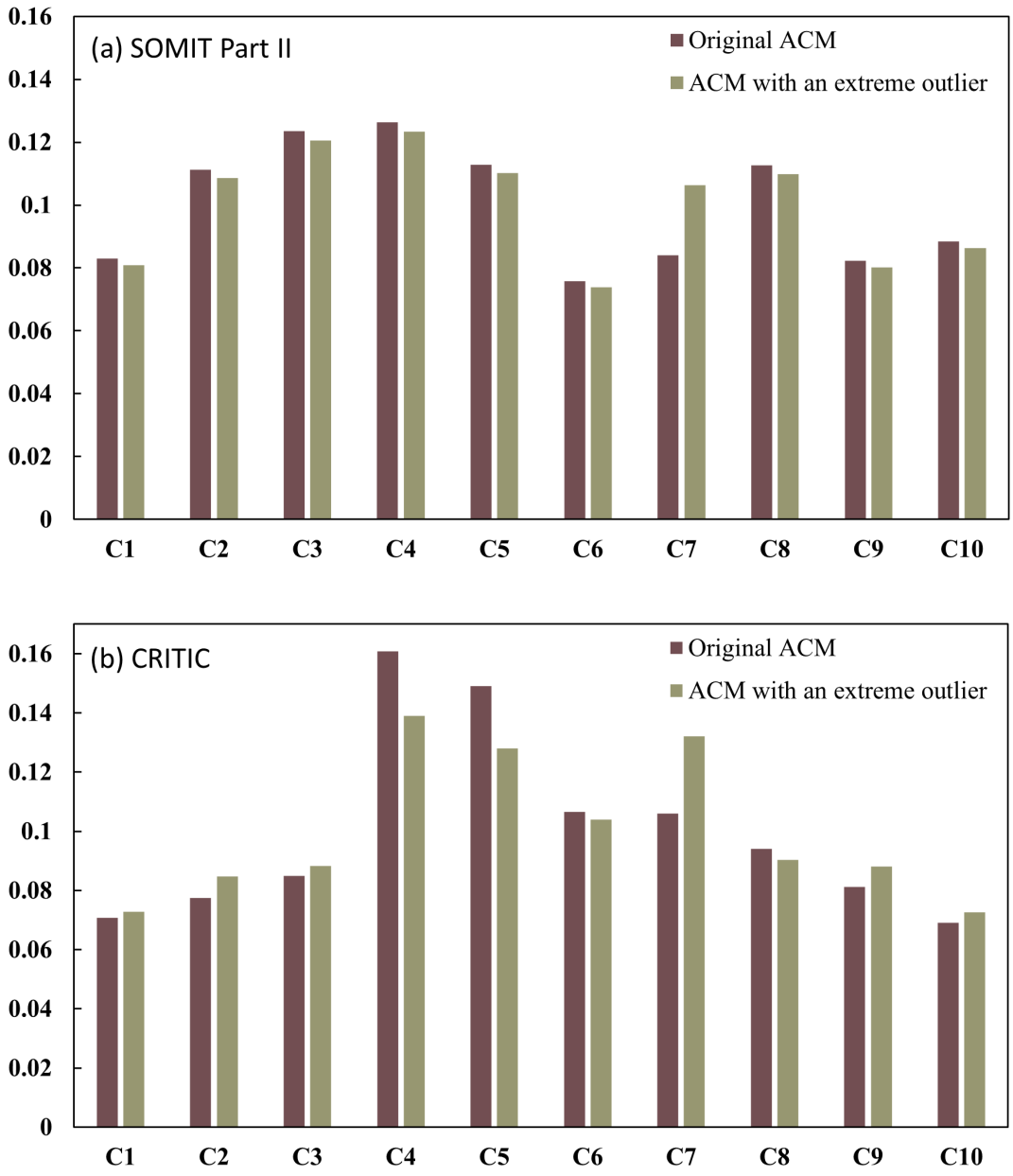


图8. 基于原始 ACM 和含有极端离群值的 ACM，由 (a) SOMIT 第二部分和 (b) CRITIC 确定的客观准则权重。

此外，为开展更多敏感性／稳健性分析，我们采用 Nabavi 等人（2023）提出的综合方法，评估赋权方法对 ACM 中引入的变化或修改的响应。为进行一致性分析，考虑的第一项修改是对准则进行线性变换，其根源是价值尺度独立性（IVS）原则

。IVS 指出，客观赋权法的结果应尽可能不受准则测量尺度线性变化的影响。简单来说，无论某项准则（例如社会接受度问卷）采用原始的 1–5 标度（1、2、3、4、5）衡量，还是通过诸如 $y = 2x - 1$ 的函数线性变换为 1–9 标度，理性决策过程（例如赋权步骤）得出的结果都应尽可能不受影响。第二项修改是对准则进行倒数重构，这种情况可能出现在数据测量／收集或优化模型设计过程中。例如，最小化温室气体排放（克二氧化碳/千瓦时）可以通过取倒数，等价地重构为最大化单位温室气体排放的能源产量（千瓦时/克二氧化碳）；也可以重构为最大化“常数减去温室气体排放”，其中该常数可代表最大允许排放水平。在这种情况下，理性决策框架也应得出尽可能不受影响的结果。在印度可再生能源评估案例研究中，我们对 ACM 进行了多项修改，如表13所示。首先，将技术成熟度准则（C6）从原始的 1–5 标度线性变换为 1–9 测量尺度。其次，通过取倒数，将温室气体排放（克二氧化碳/千瓦时）准则（C7）等价地重构为最大化单位温室气体排放的能源产量（千瓦时/克二氧化碳）。第三，就就业创造（人年/GWh）准则而言，所有原始值均小于 1，因此将其重新定义为最小化“1 减去就业创造”，以表示各备选方案距离实现阶段性目标（即当前发展阶段达到 1 人年）有多远（数值／距离越小，表示表现越好）。

表13. 用于敏感性分析的经修改的 ACM。

	财务			技术			环境		社会	
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
太阳能	596	9	0.038	22	19	7	1/48	12	0.13	4.58
Wind	1038	28	0.04	35	33	7	1/11	250	0.83	4.17
水能	1817	45.425	0.065	76.61	57	9	1/24	500	0.73	3.56
生物质能	1154	46.16	0.057	84.33	68	5	1/230	13	0.79	4

Nabavi 等人（2023）提出了一项特定指标——权重平均绝对分数偏差（$AAFDw$），用于量化原始 ACM 修改后权重的变化：

$$AAFDw = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{\left|WO_j - WM_j\right|}{\left|\frac{WO_j + WM_j}{2}\right|} \tag{23}$$

其中，n 表示准则的数量，WO_j 和WM_j 分别表示原始 ACM 和修改后 ACM 中针对j^{th}准则计算得到的权重。当$AAFDw$ 值趋近于零或保持在可忽略水平时，表明敏感度水平最低。应用该指标，将 SOMIT 和 CRITIC 获得的客观权重分别与其基于原始 ACM 得出的权重进行比较。分析表明，SOMIT 的权重平均绝对分数偏差为 1.9%，而 CRITIC 的为 2.5%，这说明 SOMIT 的稳健性高于基准方法 CRITIC。

除了与层次分析法和CRITIC进行方法学比较外，本研究的发现还对可再生能源规划具有若干管理和政策层面的启示。首先，SOMIT为决策者提供了一种结构化且透明的方法，以平衡主观专家意见与客观的ACM数据集。SOMIT通过减少所需的主观比较，并采用中位数来减轻离群值的影响，提升了效率和稳健性。因此，它尤其适用于大规模可再生能源评估，在这类评估中，需要对多种准则进行评价，且数据不确定性较为常见。从管理角度看，印度案例研究表明，SOMIT不仅能凸显太阳能的成本优势，也能揭示其权衡取舍，例如与其他方案相比，其全生命周期温室气体排放更高。这些见解使规划者能够更全面地了解部署挑战，包括环境可持续性和社会接受度；而这对于实现该国雄心勃勃的可再生能源目标至关重要。在沙特阿拉伯，SOMIT支持在愿景2030框架下对太阳能进行战略优先排序，同时也阐明了生物质能和地热能等备选方案在当地环境中可行性较低的原因。对于管理者和政策制定者而言，这确保投资决策不仅在技术上可靠，也符合国家优先事项和资源实际情况。更广泛地说，SOMIT为能源管理者、政策制定者和组织领导者提供了一种可靠的工具，可用于各种能源系统应用中的资源配置、项目选择和政策设计。它能够整合多种观点、减轻决策者的认知负担，并得出稳健且易于解释的结果，从而为管理者提供了一种指导可再生能源战略的实用方法。因此，SOMIT弥合了方法学发展与实际应用之间的差距，直接助力循证能源规划和管理决策。

最后但同样重要的是，虽然 SOMIT 减轻了比较负担、增强了对离群值的稳健性，并平衡了主观与客观输入，但它仍依赖于现有数据和专家判断的质量与代表性。如果某项应用的 ACM 是

根据不完整、过时或有偏差的数据构建，或者主观评估由缺乏足够领域专业知识的个人提供，那么最终的权重及后续排序仍可能受到影响。简而言之，尽管采用中位数能够减轻极端偏差，SOMIT 仍无法完全消除对输入质量的依赖。未来的工作可通过整合群体决策机制并引入先进的模糊扩展（Baydaş 等人，2025年），进一步应对这一局限，从而更好地捕捉不确定性和不精确性。

6. 结论

总而言之，本研究提出了一种新型混合赋权方法 SOMIT，以助力多准则决策过程。鉴于准则权重发挥着关键作用，SOMIT 通过在模块化、易用且计算高效的框架中整合专家主观判断与客观数据洞见，克服了传统方法的局限。SOMIT 的三部分设计显著减轻了决策者的认知负担：将主观成对比较的数量减少到线性规模；利用基于归一化中位数的离散度，从 ACM 数据中提取有意义的客观权重（该数据本身对离群值具有更强的稳健性）；并通过乘法合成合并两类权重，以确保平衡并减轻偏差。我们还开发了专用 Python 库 pysomit，以简化并精简 SOMIT 方法在可再生能源评估应用中的使用。

SOMIT应用于印度和沙特阿拉伯的两个真实案例研究，涉及可再生能源的评估与选择。在这两个案例中，SOMIT为涵盖财务、技术、环境和社会维度的准则计算出一组权重。随后，将这些权重与TOPSIS方法结合，同时考虑多个准则，对可再生能源方案进行排序。SOMIT提供了一个模块化且灵活的框架，可轻松整合多种多准则决策方法，从而扩展其在其他领域以及需要平衡且因情境而异的赋权的决策问题中的实用性。从实践角度看，SOMIT为政策制定者、规划者和利益相关方提供了一种更透明、更有条理的准则权重计算方法；这是能源决策中的关键步骤，尤其适用于可再生能源转型等复杂且快速演变的情境。通过整合专家知识与实证数据，SOMIT能够提供可靠、易于解读且结合具体情境的见解，直接支持碳中和、技术部署策略和可再生能源投资优先级排序等应用能源领域的挑战。因此，本研究的贡献

不仅限于方法创新，还在于为推进现实世界中的能源系统与政策提供决策支持工具。SOMIT的一个局限是，尽管采用中位数能够降低极端离群值的影响，该方法仍取决于输入数据（无论是主观评估数据还是ACM数据）的质量和可靠性。未来研究可通过纳入群体决策机制，并扩展该方法以更好地处理不确定、不精确和模糊输入，进一步改进SOMIT。除了本研究中介绍的多准则可再生能源评估的两个案例研究外，未来还可将SOMIT应用于更广泛的现实能源场景，例如智能电网中的技术组合选择、地点/场址选择、能源存储规划、工业和交通脱碳以及碳中和战略。这些更广泛的应用将进一步展示SOMIT为政策制定者、管理者和行业利益相关者带来的实际效益。

参考文献

Ali, A., Alsulaiman, F. A., Irshad, K., Shafiullah, M., Malik, S. A., & Memon, A. H.（2021年3月）。从政策网络理论视角看沙特阿拉伯愿景2030目标的可再生能源配额标准。载于*2021*年第四届国际能源节约与能效会议（*ICECE*）（第1-5页）。IEEE。Amiri, A. A., Wahid, M. N., Al-Buraiki, A. S., & Al-Sharafi, A.（2024年）。基于层次分析法-TOPSIS的沙特阿拉伯可再生能源来源选择战略性多准则决策框架。《可再生能源》，*236*，121523。Anwar, A., Sinha, A., Sharif, A., Siddique, M., Irshad, S., Anwar, W., & Malik, S.（2022年）。城市化、可再生能源消费、金融发展与CO 2排放之间的关联：来自部分亚洲国家的证据。《环境、发展与可持续性》，1-21。Baydaş, M., Turgay, S., Ömeroğlu, M. K., Aydin, A., Baydaş, G., Stević, Ž., ... & Selçuk, M.（2025年）。采用准D-重叠函数的精炼模糊MARCOS方法：用于基于物联网的医疗保健系统中直观、一致且灵活的传感器选择。《数学》，*13*(15)，2530。https://doi.org/10.3390/math13152530 Bertsekas, D. P.（1982年）。约束优化与拉格朗日乘子法。学术出版社。Bilgili, F., Zarali, F., Ilgün, M. F., Dumrul, C., & Dumrul, Y.（2022年）。使用直觉模糊TOPSIS方法评估土耳其的可持续发展可再生能源方案。《可再生能源》，*189*，1443-1458。Brodny, J., & Tutak, M.（2023年）。从两个视角评估欧盟国家的能源安全——一种基于多准则决策方法的新型综合方法。《应用能源》，*347*，121443。

Carmone Jr, F. J., Kara, A., & Zanakis, S. H.（1997年）。AHP中不完整两两比较矩阵的蒙特卡洛研究。《欧洲运筹学杂志》，102(3)，538-553。Chen, F., Zhang, W., Chen, R., Jiang, F., Ma, J., & Zhu, X.（2024年）。适应碳中和：为发展中国家量身定制先进的减排策略。《应用能源》，361，122845。Dafnomilis, I., den Elzen, M., & van Vuuren, D. P.（2023年）。实现净零排放目标：使用综合评估模型分析长期情景。《纽约科学院年鉴》，1522(1)，98-108。de Souza Grilo, M. M., Fortes, A. F. C., de Souza, R. P. G., Silva, J. A. M., & Carvalho, M.（2018年）。热泵电力供应的碳足迹：太阳能与电网。《可再生与可持续能源杂志》，10(2)。Elkadeem, M. R., Younes, A., Sharshir, S. W., Campana, P. E., & Wang, S.（2021年）。混合可再生能源系统的可持续选址与设计优化：地理空间多准则分析。《应用能源》，295，117071。Guo, S., & Zhao, H.（2015年）。基于可持续性视角，使用模糊TOPSIS进行电动汽车充电站的最优选址。《应用能源》，158，390-402。Hafezalkotob, A., Hafezalkotob, A., Liao, H., & Herrera, F.（2019年）。MULTIMOORA多准则决策的综述：理论、发展、应用与挑战。《信息融合》，51，145-177。Halkos, G. E., & Gkampoura, E. C.（2020年）。可再生能源的使用、潜力与局限性综述。Energies，13(11)，2906。Hassan, R., Das, B. K., & Hasan, M.（2022年）。基于经济、环境和社会指标的综合离网混合可再生能源系统优化，以实现可持续发展。《能源》，250，123823。Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., ... & Jaszczur, M.（2024年）。可再生能源在全球能源转型中的作用。《可再生能源聚焦》，48，100545。Husain, A. M., Hasan, M. M., Khan, Z. A., & Asjad, M.（2024年）。印度最优可再生能源来源选择的稳健决策方法。《能源转换与管理》，301，117989。Hwang, C.-L., & Yoon, K.（1981年）。《多属性决策：方法与应用》。Springer：柏林，德国。国际能源署。（2021年）。《印度能源展望2021》。IEA。https://www.iea.org/reports/india-energy-outlook-2021 Kar, S. K., Harichandan, S., & Prakash, O.（2024年）。影响印度可再生能源采用的因素：以可持续发展目标补充技术驱动因素与障碍。《管理研究进展杂志》，21(2)，245-266。Karunathilake, H., Hewage, K., Mérida, W., & Sadiq, R.（2019年）。净零能源社区的可再生能源选择：不确定性下基于生命周期的决策。《可再生能源》，130，558-573。Kumar, R., & Pamucar, D.（2025年）。解决决策问题的多准则决策（MCDM）方法的全面系统综述：二

2004年至2024年间的数十年。《决策与应用谱系》，2(1), 178-197. Li, B., Nian, V., Shi, X., Li, H., & Boey, A. (2020). 东亚和东南亚能源转型的前景。《Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment》，9(1), e364. Li, X., Xu, L., Cai, J., Peng, C., & Bian, X. (2024). 运用涉及D数和挤压对抗解释结构模型法的多准则决策技术进行海上风力涡轮机选择。《应用能源》，368, 123381. Murtaja, M., Bajpai, S., & Sharma, M. K. (2025). 印度条件下运用多准则决策-TOPSIS方法选择最优可再生能源。《Indian Chemical Engineer》，1-20. Nabavi, S. R., Wang, Z., & Rangaiah, G. P. (2023). 面向工程应用的多准则决策方法敏感性分析。《Industrial & Engineering Chemistry Research》，62(17), 6707-6722. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04270 Nabavi, S. R., Wang, Z., & Rodríguez, M. L. (2024). 乙烷氧化脱氢多管式填充床膜反应器的设计：多目标优化与多准则决策方法。《Energy & Fuels》，39(1), 491-503. Nugent, D., & Sovacool, B. K. (2014). 评估太阳能光伏和风能的全生命周期温室气体排放：一项批判性元综述。《能源政策》，65, 229-244. Pandey, V., Komal, & Dinçer, H. (2023). TOPSIS方法及其扩展在不同应用中的最新进展综述。《Soft Computing》，27(23), 18011-18039. Pereira, V., Basilio, M. P., & Santos, C. H. T. S. H. T. (2024). 借助大语言模型提升决策分析：用于Python中多准则决策分析方法的综合库pydecision。《arXiv》预印本 arXiv:2404.06370. Prayogo, B., Yudisaputro, H., & Kurniawan, A. (2023年12月). 提升可再生能源并网：采用混合AHP-TOPSIS方法，为太阳能光伏和风力涡轮机系统选择最优逆变器。载于《IEEE未来电网能源技术国际会议（ETFG）》(第1-6页)。IEEE. Qamruzzaman, M., & Karim, S. (2024). 揭示协同效应：绿色金融、技术创新、绿色能源与碳中和。《PLOS ONE》，19(10), e0308170. Qi, Q., Wu, J., & Long, C. (2017). 配备柔性软开点的配电网多目标运行优化。《应用能源》，208, 734-744. Rabbi, M. F., Popp, J., Máté, D., & Kovács, S. (2022). 实现碳中和的能源安全与能源转型。《Energies》，15(21), 8126. Rahim, N., Abdullah, L., & Yusoff, B. (2020). 基于双极中智语言变量的可持续能源选择边界近似区域法。《Sustainability》，12(10), 3971. Ridha, H. M., Hizam, H., Mirjalili, S., Othman, M. L., Ya'acob, M. E., & Ahmadipour, M. (2023). 将双档案法与PROMETHEE-II三目标多准则决策相结合，为混合可再生能源系统确定最优配置。《应用能源》，341, 121117. Sahoo, S. K., Choudhury, B. B., Dhal, P. R., & Hanspal, M. S. (2025). 面向可持续可再生能源发展的多准则决策（MCDM）综合综述。《运筹学谱系》，2(1), 268-284。

Saaty, T. L. (1990年). 如何进行决策：层次分析法。《欧洲运筹学杂志》，48(1), 9-26. Sitorus, F., & Brito-Parada, P. R. (2020). 不确定性条件下为可再生能源技术的可持续性准则赋权的一种多准则决策方法。《Renewable and Sustainable Energy Reviews》，127, 109891. Solangi, Y. A., Longsheng, C., & Shah, S. A. A. (2021). 评估并克服巴基斯坦可持续发展面临的可再生能源障碍：集成AHP与模糊TOPSIS方法。《Renewable Energy》，173, 209-222. Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). 采用一种新的多准则决策方法，在医疗保健行业进行可持续供应商选择：基于折衷解的备选方案测量与排序（MARCOS）。《Computers & industrial engineering》，140, 106231. Tian, J., Yu, L., Xue, R., Zhuang, S., & Shan, Y. (2022). 后新冠疫情时代的全球低碳能源转型。《Applied energy》，307, 118205. Terada, L. Z., Magalhães, M. M., Cortez, J. C., Soares, J., Vale, Z., & Rider, M. J. (2025). 微电网规模设计、电动汽车调度和车网互动集成的多目标优化。《Sustainable Energy, Grids and Networks》，43, 101773. Su, P., Zhou, Y., & Wu, J. (2023). 融合可再生能源和储能系统的炼钢厂多目标调度：平衡成本、排放与完工时间。《Journal of Cleaner Production》，428, 139350. Tabrizi, A., Yousefi, H., Abdoos, M., & Ghasempour, R. (2025). 评估七国集团国家的可再生能源采用：基于TOPSIS的多准则决策分析。《Discover Energy》，5(1), 2. Terlouw, T., Gabrielli, P., AlSkaif, T., Bauer, C., McKenna, R., & Mazzotti, M. (2023). 多能源系统的最优经济与环境设计。《Applied energy》，347, 121374. Tutak, M., & Brodny, J. (2022). 欧盟27国经济部门的可再生能源消费：对经济、环境和传统能源的影响——20年视角。《Journal of Cleaner Production》，345, 131076. Umar, M. M., & Yadaw, P. K. (2024). 释放印度的太阳能潜力：国家太阳能使命综述及印度实现可持续能源的路径。《Journal of Technology Innovations and Energy》，3(2), 46-63. Vaziri Rad, M. A., Forootan Fard, H., Khazanedari, K., Toopshekan, A., Ourang, S., Khanali, M.,...Kasaeian, A. (2024). 农光互补可再生能源系统可持续发展指数最大化的全球框架：集成DEMATEL、网络分析法和多准则决策方法。《应用能源》，《 360》，122715. Wang, Z., Li, J., Rangaiah, G. P., & Wu, Z. (2022). 机器学习辅助的多目标优化与多准则决策：框架及其在化学工程中的两项应用。《 Computers & Chemical Engineering》，165, 107945. Wang, Z., Nabavi, S. R., & Rangaiah, G. P. (2023). 精选多准则决策方法及其在产品与系统设计中的应用。载于《产品与系统设计优化方法》(第107-138页)。新加坡：Springer Nature Singapore. Wang, Z., Parhi, S. S., Rangaiah, G. P., & Jana, A. K. (2020). 多目标优化中帕累托最优解的赋权与选择方法分析,

化学工程应用。《Industrial & Engineering Chemistry Research》，59(33)，14850-14867。Wang, Z. 与 Rangaiah, G. P.（2017年）。通过多目标优化获得的帕累托最优前沿中选择最优解的方法：应用与分析。《Industrial & Engineering Chemistry Research》，56(2)，560-574。Wang, Z.、Rangaiah, G. P. 与 Wang, X.（2021年）。基于理想—平均距离法的多准则决策偏好排序。《Industrial & Engineering Chemistry Research》，60(30)，11216-11230。Yazdani, M.、Torkayesh, A. E.、Santibanez-Gonzalez, E. D. 与 Otaghsara, S. K.（2020年）。采用综合香农熵—EDAS模型评估可再生能源资源。《Sustainable Operations and Computers》，1，35-42。Zhang, L.、Xin, H.、Yong, H. 与 Kan, Z.（2019年）。采用混合多准则决策方法评估可再生能源项目绩效：以中国福建为例。《Journal of Cleaner Production》，206，1123-1137。Zhao, J.、Liu, Y.、Tu, Z. 与 Chan, S. H.（2025年）。分布式可再生能源发电系统的新型灵活负荷调节与4E-F多目标优化。《应用能源》，383，125410。