

引用格式:李小双,冷亚军,吴坚.基于多目标投影寻踪模型的电力发展水平评价方法[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):46-57.

Citation: LI Xiaoshuang, LENG Yajun, WU Jian. Evaluating method for power development level based on multi-objective projection pursuit model [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 46-57.

基于多目标投影寻踪模型的电力发展水平评价方法

李小双^{1,2}, 冷亚军¹, 吴坚³

(1. 上海电力大学经济与管理学院, 上海 200090; 2. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200000;
3. 上海海事大学经济管理学院, 上海 201306)

摘要: 电力生产活动所释放的碳排放在全球碳排放总量中占比较高。因此, 电力行业成为推动“碳减排”目标达成的关键责任主体。借助量化综合评价的方式对国家电力发展水平进行评估, 不仅可以清晰地描绘出各国在电力领域的发展脉络, 而且有助于更准确地识别出中国与其他国家在电力发展上的差距。该文对国家电力发展水平进行综合评价与研究, 提出一种基于改进多目标粒子群算法优化投影寻踪模型的电力发展水平评价方法。首先, 提出改进的多目标粒子群优化算法; 其次, 建立 2 种投影寻踪模型, 利用改进的多目标粒子群算法优化构建 2 种投影寻踪模型, 得到投影向量的最优 Pareto 解集; 再次, 利用模糊综合评价, 得到最优权重折中解, 将最优权重代入前景理论模型, 得到各个国家电力发展水平的综合评分值, 并基于此评分, 对各国电力发展水平优劣进行客观排序, 最后, 利用实际的国家电力发展水平数据集对该文所提方法进行验证。研究结果表明: 该方法可实现对国家电力发展水平的有效排序, 其评价准确性优于现有的电力发展水平评价方法的。

关键词: 电力发展水平; 改进的多目标粒子群算法; 投影寻踪模型; 评价方法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.005 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)05-0046-12

Evaluating method for power development level based on multi-objective projection pursuit model

LI Xiaoshuang¹, LENG Yajun¹, WU Jian²

(1. College of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Electric Power Consulting Group, Shanghai 200000, China;
3. School of Economics and Management, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Carbon emissions from electricity production activities account for a significant proportion of total global emissions. Therefore, the power industry has become a key stakeholder in achieving "carbon emission reduction" goals. By employing a quantitative comprehensive evaluation approach to assess national power development levels, we can not only clearly delineate the development trajectory of various countries in the power sector but also more accurately identify the gaps between China and other countries in power development. This paper conducts a comprehensive evaluation and research on national power development levels and proposes an evaluation method for power development levels based on an improved multi-objective particle swarm optimization (MOPSO) algorithm to optimize the projection pursuit model. Firstly, an improved MOPSO algorithm is proposed. Secondly, two projection pursuit models are established, and further optimized using the improved MOPSO algorithm to obtain the optimal Pareto solution set for the projection vectors. Finally, a fuzzy comprehensive evaluation is used to obtain the optimal weight compromise solution, which is then substituted into the prospect theory model to derive comprehensive scores for the power development levels of various countries. Based on these scores, an objective ranking of the power development levels of various countries is conducted. The proposed method is validated using an actual dataset of national power

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2024-03-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(71971135); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(No.22YJCZH073)

通信作者: 冷亚军(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事综合能源系统评价、数据挖掘等方面的研究; E-mail: huayi2001@163.com

development levels. The experimental results demonstrate that this method can effectively rank national power development levels, with evaluation accuracy superior to existing evaluation methods for power development levels.

Key words: power development level; improved multi-objective particle swarm algorithm; projection pursuit model; evaluation method

在全球能源转型的大背景下,为实现经济可持续发展,应对能源短缺、气候变化等问题,世界各国积极探索发展绿色电力。目前,二氧化碳排放主要来源于能源活动。其中,电力生产活动产生的碳排放量在全社会能源活动碳排放中的占比很高,因此,电力行业成为减少二氧化碳排放量的重要责任主体^[1-2]。电力发展受到技术和能源结构的影响,不同国家的经济、社会、资源和环境状况各不相同。因此,电力发展水平是衡量一个国家或地区经济发展程度、碳排放强度与用电量在终端能耗中所占比重的关键指标^[3]。对中国国家电力发展水平的量化综合评价,能准确了解中国电力发展所处的位置,为中国电力发展制定发展计划。中国电力发展与世界许多国家的联系日益紧密,其相互作用和依赖性均在不断增强。因此,有必要客观了解全球电力产业的发展情况,及时了解世界各国的发展趋势和先进经验^[4]。对多个国家电力发展水平进行综合评价和分析,能为中国的电力工业发展提供决策参考,对推动中国电力工业绿色发展和低碳转型具有重要意义^[5-6]。

近年来,学者们对电力工业综合评价的研究取得了一定的成果。文献[7]提出了一种基于云模型求解主观评价价值的方法,先利用熵权法求解客观评价价值,再使用逼近理想解排序(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法对地区电力发展水平进行综合评价。文献[8]考虑了经济能源协调度、发电、用电、供电和发展潜力等评估因素,建立了基于投影寻踪方法的地区电力发展水平的静态评价模型,对中国省级电力发展水平进行了评价。文献[9-10]采用主成分分析法和综合赋权法,综合考虑低碳电网的各影响因素,提出了低碳电网评价指标体系和量化评价方法。该评价指标体系可评估电网的可持续性和环境友好性。文献[11]采用主成分分析法和粗糙集方法,对17个国家的清洁能源发展水平进行了排序。文献[12]从评价对象、指标、方法和结果应用4个维度,对面向高比例可再生能源并网的输电网规划方案进行了综合排序,为电网规划提供了有价值的参考。文献[13-14]利用多目标优化对含可再生能源的电力

系统进行评价,分析了绿色技术在微电网系统中的可靠性。文献[15-16]构建了一个考虑安全、效益、成本和适应性的电网规划综合评价指标体系,并采用博弈论模型进行评估。文献[17]采用模糊组合赋权评价方法,依据最大隶属度对电力企业进行了多层次模糊综合评价。

目前,关于电力发展水平评价在指标权重的确定和排序方法存在许多不足。如:主成分分析法要求评价数据通过KMO(kaiser-meyer-olkin)检验;熵权法存在着权重分配差别过大或权重无法体现决策矩阵微小变化等缺点;TOPSIS法未考虑决策者预期收益和损失。因此,本文提出了一种基于改进多目标粒子群算法优化投影寻踪模型的电力发展水平评价方法(improve multiple objective particle swarm optimization projection pursuit based electric power development level evaluation method, M-PP),对多个国家的电力发展水平评价问题展开研究。首先,提出了改进的多目标粒子群优化算法(improve multiple objective particle swarm optimization, IMOPSO);其次,构建2种投影寻踪模型(projection pursuit, PP),利用IMOPSO同时优化所构建的两种PP模型,得到投影向量的最优帕累托(Pareto)解集,利用模糊综合评价得到最优权重折中解;最后,将最优权重代入前景理论模型,得到电力发展水平的综合前景值,利用综合前景值计算得到综合评分值,实现对各国家电力发展水平的优劣排序。并利用实际的国家电力发展水平数据集对该方法进行了验证。实验结果表明:M-PP方法可以实现对国家电力发展水平的有效排序,其评价准确性优于现有的电力发展水平评价方法的。本文研究的主要贡献在于:

1) 提出了一种改进的多目标粒子群算法, IMOPSO较好地解决了传统多目标粒子群算法难以保持Pareto最优解集多样性、容易陷入局部最优和Pareto最优前沿分布不均等问题。

2) 将一维投影寻踪法和动态投影寻踪法相结合,建立多目标模型,采用改进的多目标粒子群算法进行求解,得到评价指标的最优权重。相较于单一的一维投影寻踪、动态投影寻踪方法,该方法的指标权重可靠性更好。

3) 利用实际的国家电力发展水平数据集,对该方法与现有的电力发展水平评价方法进行了比较。研究表明:该方法获取的指标权重合理,排序结果较满意,评价准确性优于现有评价方法的准确性。

1 电力发展水平评价指标体系

每个国家的经济、社会、资源和环境状况各异,其电力发展受到技术水平和该国能源结构的深刻影响。因此,电力发展水平成为衡量国家经济发展程度、电力能源发展状况以及电力现代化水平的重要指标。这一指标不仅反映了国家在电力基础设施方面的建设成就,也揭示了其能源利用效率和可持续发展水平。本文采用文献[7]的电力发展水平评价指标体系。该电力发展水平评价指标体系中包括4个一级指标:电力供应、电力消费、电气化水平和碳排放水平。其中,电力供应由指标 $y_1 \sim y_{10}$ 构成,电力消费由指标 $y_{11} \sim y_{13}$ 构成,电气化水平由指标 $y_{14} \sim y_{15}$ 构成,碳排放则由指标 $y_{16} \sim y_{17}$ 构成。详细的二级指标见表1。

表1 电力发展水平指标^[7]

Table 1 The indicator of power development level

指标名称	指标性质	单位	符号
总发电量	效益性	kW·h	y_1
总装机容量	效益性	万kW	y_2
燃煤发电份额	成本型	%	y_3
石油发电份额	成本型	%	y_4
天然气发电份额	效益性	%	y_5
水力发电份额	效益性	%	y_6
核能发电份额	效益性	%	y_7
风力发电量份额	效益性	%	y_8
太阳能光伏发电份额	效益性	%	y_9
生物燃料发电份额	效益性	%	y_{10}
总用电量增长率	效益性	%	y_{11}
人均年用电量	效益性	kW·h	y_{12}
用电强度	成本型	%	y_{13}
发电能源消费占一次能源消费比重	效益性	%	y_{14}
用电量占终端能耗比重	效益性	%	y_{15}
人均二氧化碳排放量	成本型	%	y_{16}
碳强度	成本型	%	y_{17}

2 投影寻踪模型

投影寻踪模型是一种通过将多指标高维数据

投影到低维空间来对数据进行降维和分析的统计方法。在数据的投影过程中,该方法保留了数据的主要特征,降低了维度^[18]。投影寻踪模型种类有很多,基于密度型投影指标函数的一维模型与基于动态聚类的投影寻踪模型是其中搜索效果较好的。基于密度型投影指标函数的一维模型以样本投影值的标准差和局部密度值的乘积作为目标函数;基于动态聚类的投影寻踪模型以样本投影值中不同类的2个样本的绝对距离与同一类样本距离的差作为目标函数。基于密度型投影指标函数的一维模型的投影窗口半径在实际中较难确定,这可能造成样本点局部密集程度不够的问题。基于动态聚类的投影寻踪模型则存在聚类分类问题,可能导致同一类样本密集程度不够。

2.1 基于密度型投影指标函数的一维模型

密度型投影指标函数中含有需要计算样本投影点的密度值。假设第 i 个样本的第 j 个指标的归一化值为 $x_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$, m, n 分别为样本容量与指标数目。

设一维空间的投影方向 $a=(a_1, a_2, \dots, a_n)^T$, 则样本在该方向上投影特征值 $z_1(i)$ 的计算式为

$$z_1(i) = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \quad (1)$$

类间距离为投影的标准差。该值越大,样本投影点整体上越分散。标准差 $S_1(a)$ 的计算表达式为

$$S_1(a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (2)$$

式中, n 为样本个数; \bar{z} 为样本一维投影值 $z(i)$ 的均值。

类间密度能够表征样本投影点的局部密度程度。类间密度越大,局部密集程度越高。为了实现局部尽可能集中,类与类之间应尽可能分散。类间密度 $D_1(a)$ 的计算公式为

$$D_1(a) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (R - r_{ik}) f(R - r_{ik}) \quad (3)$$

式中, $r_{ik} = |z(i) - z(k)| (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, m)$ 为投影特征值之间的距离; $f(R - r_{ik})$ 为单位阶跃函数,当 $R \geq r_{ik}$ 时,其值为1;否则,其值为0。一维投影寻踪模型^[19]为

$$\begin{aligned} Q_1(a) &= \max S_1(a) D_1(a) \\ \text{s.t. } & \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1, a_i \in [-1, 1] \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 基于动态聚类的投影寻踪模型

该模型选用线性加权方法,计算样本投影点的密度值。该密度值 $z_2(i)$ 的计算公式为

$$z_2(i) = \sum_{j=1}^n a_j x_{ij} \quad (5)$$

设备选方案投影特征值集合 $\Omega = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$,记 $d(z_i - z_k)$ 为同一类内投影特征值的绝对值距离,假设将投影特征值分为 $N(2 < k < m)$ 类, $\Theta_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 为第 i 类样本投影特征值集合。

$$\Theta_i = \{z_t | d(A_h - z_i) \leq d(A_t - z_i)\}, \quad (6)$$

$$t = 1, 2, \dots, N; t \neq h$$

式中, $d(A_h - z_i) = |A_h - z_i|$; $d(A_t - z_i) = |A_t - z_i|$, A_h 和 A_t 分别为第 h 类和第 t 类的初始聚核。

类内方案的邻近程度用类内聚度 $D_2(a)$ 来表示(即类内所有两个样本点之间的绝对距离之和),其计算式为

$$D_2(a) = \sum_{i=1}^N d_i(a) \quad (7)$$

$$d_i(a) = \sum_{z_i, z_k \in \Theta_h} d(z_i, z_k), \quad (z_i, z_k \in \Theta_h) \quad (8)$$

式中,类内的两样本之间的绝对距离之和为 $d_i(a)$ ($i = 1, 2, \dots, N$),该值越小,类内方案的聚集程度越高; $D_2(a)$ 为类内方案邻近程度。

方案间的离散程度为

$$S_2(a) = \sum_{z_i, z_k \in \Omega} d(z_i, z_k), \quad (z_i, z_k \in \Omega) \quad (9)$$

式中, $S_2(a)$ 为方案间离散程度。 $S_2(a)$ 越大,方案之间的离散程度越高。因此,构建既能使得类内样本点密集,又可实现样本点整体上分散的模型,即

$$\begin{cases} Q_2(a) = \max(S_2(a) - D_2(a)) - D_2(a) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1, a_i \in [-1, 1] \end{cases} \quad (10)$$

显然,当 $Q_2(a)$ 取最大值时,可实现类内备选方案尽可能集中,类间备选方案尽可能散开的目标。

3 本文方法

3.1 改进的多目标粒子群算法

多目标粒子群优化算法虽然发展较为成熟,但仍存在以下问题:难以保持 Pareto 最优解集的多样性,全局最优解更新策略复杂;容易陷入局部最优解中,寻优能力较差;Pareto 最优前沿分布不均匀^[20-22]。为提高多目标粒子群算法的整体性能,更好地解决多目标优化问题,本文提出一种改进的多目标粒子群算法,具体步骤如下。

1) 设置惯性动态权重。

本文采用动态惯性权重来平衡算法的全局搜索和局部搜索。其表达式为

$$w_i = w_{\max} - \frac{g^2(w_{\max} - w_{\min})}{g_{\max}^2} \quad (11)$$

式中, w_i 为惯性权重; w_{\max} 是惯性权重的最大值; w_{\min} 是惯性权重的最小值; g 为当前的迭代次数; g_{\max} 是最大迭代次数。此改进有利于在初始迭代时寻找满足条件的局部最优值。

2) Sine 混沌映射初始化种群。

针对传统多目标粒子群算法在迭代后期出现种群多样性减少,易陷入局部最优等难题,提出了利用 Sine 混沌映射对种群进行初始化的方法,提高了初始解的质量,增加了种群多样性^[23]。Sine 混沌映射公式如下:

$$X_{i+1} = \frac{4}{\lambda} \sin(\pi X_i) \quad (12)$$

式中, X_i 为迭代序列值; $\lambda \in (0, 4]$ 。

3) 引入 Levy 飞行变异机制。

为防止多目标粒子群陷入局部最小,种群在搜索空间中多样性的丢失,本文利用 Levy 飞行的变异机制来提高种群的多样性,这既保证了种群对附近区域详细搜索,又具有一定的突变性^[24-25]。Levy 飞行路径的计算公式为

$$s = \left(\frac{u}{v}\right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (13)$$

式中, s 为 Levy 飞行路径; $0 < \beta < 2$;参数 u, v 均为正态分布随机数,均服从正态分布:

$$\begin{cases} u \sim N(0, \sigma_u^2) \\ v \sim N(0, \sigma_v^2) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \sigma_u = \frac{\Gamma(1 + \beta) \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1 + \beta)/2] 2^{(\beta-1)/2} \beta} \\ \sigma_v = 1 \end{cases} \quad (15)$$

Levy 飞行变异规则:计算惯性权重因子 w_i ,生成随机数 $r, r \in [w_{\min}, w_{\max}]$, w_{\min}, w_{\max} 分别为权重最小、最大值。利用轮盘选择是否变异(当 $r > \beta$,对选择粒子进行 Levy 飞行变异;否则,不变异。)

3.2 评价矩阵标准化

在对国家的电力发展水平评价中,假设有 m 个评价国家, n 个评价指标。记国家集 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$,电力发展水平评价指标集 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 。因此,电力发展水平评价矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

式中, A 为电力发展水平评价矩阵; a_{ij} 为第 i 个国家 s_i 在第 j 个指标 y_j 上的评价价值。

本文方法的指标权重建立在无量纲的数据集上, 所以需要对电力发展水平评价矩阵进行标准化处理。对原始评价矩阵进行线性标准化处理后, 得到标准化评价矩阵 B :

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix}$$

式中, b_{ij} 为第 i 个国家 s_i 在第 j 个指标 y_j 上的线性标准化评价价值。

$$b_{ij} = \frac{\max_i a_{ij} - a_{ij}}{\max_i a_{ij} - \min_i a_{ij}} \quad (16)$$

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_i a_{ij}}{\max_i a_{ij} - \min_i a_{ij}} \quad (17)$$

式(16)、(17)中, b_{ij} 为成本型指标时的计算式为式(16); b_{ij} 为效益型指标的计算式为式(17)。

3.3 投影向量目标函数建立与求解

将最优投影向量假设为一组 n 维的变量 $A = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$, 根据式(16)、(17)所确定出的线性标准化评价矩阵 $B = (b_{ij})_{m \times n}$, 构造加权电力发展评价矩阵 C 和在一维空间中的 2 种不同的投影寻踪模型的投影向量为 z_1 和 z_2 。

$$C = \begin{bmatrix} a_1 b_{11} & a_2 b_{12} & \cdots & a_n b_{1n} \\ a_1 b_{21} & a_2 b_{22} & \cdots & a_n b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1 b_{m1} & a_2 b_{m2} & \cdots & a_n b_{mn} \end{bmatrix}$$

$$z_1(i) = \sum_{i=1}^n a_i b_{ij} \quad (18)$$

$$z_2(i) = \sum_{i=1}^n a_i b_{ij} \quad (19)$$

多目标投影向量最优分配的数学模型是在满足约束下, 以一维投影寻踪模型指标函数最大和基于动态聚类的投影寻踪模型指标函数最大为目标的。根据式(1)~(10), 建立多目标优化的目标函数:

$$\begin{cases} \max f_1(a) = S_1(a) D_1(a) \\ \max f_2(a) = (S_2(a) - D_2(a)) - D_2(a) \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n a_i^2 = 1, a_i^1 \in [-1, 1] \end{cases} \quad (20)$$

式中, $S_1(a)$ 为一维投影向量 z_1 的标准差; $D_1(a)$ 为一维投影向量的类间密度; $S_2(a)$ 为动态投影寻踪模型下的类间分散度; $D_2(a)$ 为动态投影寻踪模型下的类间密度; a_i 为最优投影向量。

本文采用的改进多目标粒子群算法。其中算法参数为: 学习因子 $c_1 = c_2 = 1$, 根据文 3.1 步骤 1 中设置动态惯性权重, 则最小惯性权重 w_{\min} 为 0.2, 最大惯性权重 w_{\max} 为 0.6。粒子最大飞行速度 v_{\max} 为 0.15, 粒子种群数目为 100, 最大迭代次数为 10 000, 外部档案集容量为 100。本文最优投影向量的求解步骤如下:

1) 对文 3.1 步骤 2 中的 Sine 混沌映射随机生成指标权重向量个体组成的初始群体;

2) 根据适应度函数对个体进行选择, 将非支配解存入外部档案集中;

3) 通过外部档案集中存储非支配解有利于粒子的种群最优和全局最优的选择与保留, 引导种群逼近真实 Pareto 解的前沿; 在外部档案集中按照网格密度法选择密度最小的个体, 作为粒子的全局最优 G_{best} ; 根据粒子群速度和位置更新公式更新位置和速度, 同时更新 P_{best} ;

4) 利用新一代种群更新外部档案集, 若外部档案集超过最大容量, 则进行截断操作;

5) 对粒子进行文 3.1 步骤 3 中提出的 Levy 飞行变异。循环执行以上操作, 最终从外部档案集中输出投影向量的 Pareto 最优解集。

3.4 指标权重的确定

多目标优化问题通常得到的不是一个最优解, 而是一组 Pareto 解集。基于模糊集理论和最大最小原则, 本节从 Pareto 的非劣解集中提取出一个总体最优解^[24]。模糊隶属度函数定义为

$$p_i = \begin{cases} 1, & f_i < f_{i\min} \\ \frac{f_{i\max} - f_i}{f_{i\max} - f_{i\min}}, & f_{i\min} \leq f_i \leq f_{i\max} \\ 0, & f_{i\max} < f \end{cases} \quad (21)$$

式中, $i = \{1, 2, \dots, N_{\text{obj}}\}$, N_{obj} 为目标函数的个数; $f_{i\min}$ 和 $f_{i\max}$ 分别为第 i 个目标函数的下限和上限。

$$p^k = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{obj}}} p_i^k}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{N_{\text{obj}}} p_i^k} \quad (22)$$

式中, p^k 为每个解的标准化满意度值; M 为最优解的个数。

因此, 最优折中解即为具有最大标准化满意度的解。

利用 M-PP 法可得到国家电力发展水平的投影向量和投影值,但该最优投影向量的分量不一定在 $[0, 1]$ 。投影向量分量的绝对值大小反映了各样本指标在样本中的贡献程度。因此,可将经过归一化处理的最优投影向量分量作为权重。依据文 3.1、3.2、3.3 的方法,得到优化后的最优投影向量,设其为 $A^* = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$, 最优指标权重为 $W^* = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$, 即

$$|A^*| = [|a_1|, |a_2|, \dots, |a_n|]^T \quad (23)$$

$$\omega_k = \frac{|a_k|}{\sum_{j=1}^n |a_j|}, k = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

3.5 基于前景理论的方案排序

本文采用前景理论方法^[23-24]对国家电力发展水平进行排序,在标准化矩阵 B 的基础上,本文以矩阵 B 的正、负理想点作为参照点,标准化后决策矩阵的正、负理想点分别为

$$\begin{cases} d_j^+ = \max_i b_{ij} \\ d_j^- = \min_i b_{ij} \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} v_{ij}^+ = (b_{ij} - d_j^-)^\alpha \\ v_{ij}^- = -\lambda [-(b_{ij} - d_j^+)]^\beta \end{cases} \quad (26)$$

式(25)、(26)中, d_j^+ 为第 j 个正理想点; b_{ij} 为第 i 个国家第 j 个指标的标准化值; d_j^- 为第 j 个负理想点; v_{ij}^+ 为正前景矩阵的第 i 行第 j 列的元素; v_{ij}^- 为负前景矩阵的第 i 行第 j 列的元素; λ 为决策者对收益与损失的敏感系数,其值取为 2.25; α 为收益的敏感性程度, β 为损失的敏感性程度, $\alpha = \beta = 0.88$ 。将元素值代入式(26),求解得到 v_{ij}^+ 和 v_{ij}^- , 故正负前景价值矩阵 V^+ 和 V^- 分别为

$$V^+ = \begin{bmatrix} v_{11}^+ & v_{12}^+ & \dots & v_{1n}^+ \\ v_{21}^+ & v_{22}^+ & \dots & v_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1}^+ & v_{m2}^+ & \dots & v_{mn}^+ \end{bmatrix}$$

$$V^- = \begin{bmatrix} v_{11}^- & v_{12}^- & \dots & v_{1n}^- \\ v_{21}^- & v_{22}^- & \dots & v_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1}^- & v_{m2}^- & \dots & v_{mn}^- \end{bmatrix}$$

根据文 3.4 求得指标权重 ω_k , 由式(26)求得正负前景价值矩阵的指标权重 $\pi^+(\omega_i)$ 和 $\pi^-(\omega_i)$:

$$\pi^+(\omega_k) = \frac{(\omega_k)^\theta}{[(\omega_k)^\theta + (1 - \omega_k)^\theta]^{1/\theta}} \quad (27)$$

$$\pi^-(\omega_k) = \frac{(\omega_k)^\Delta}{[(\omega_k)^\Delta + (1 - \omega_k)^\Delta]^{1/\Delta}} \quad (28)$$

式(27)、(28)中, $r_{x,i}$ 为用户 x 对项目 i 的评分值; θ 为决策者的收益偏好程度,在本文中 $\theta = 0.61$; Δ 为风险规避程度风险偏好系数,在本文中 $\Delta = 0.69$ 。则可得到第 i 个国家电力发展水平综合前景值 v_i :

$$v_i = \sum_{k=1}^n v_{ik}^+ \pi^+(\omega_k) + \sum_{k=1}^n v_{ik}^- \pi^-(\omega_k) \quad (29)$$

最后,可计算得到第 i 个国家的电力发展水平评分值 q_i :

$$q_i = \frac{v_i - \min_i (v_i)}{\max_i (v_i) - \min_i (v_i)} \quad (30)$$

计算每个国家的综合评分值 q , 根据各国的综合评分值进行排序。一个国家的综合评分值越高,该国的电力发展水平越好。

基于改进的多目标粒子群算法和投影寻踪模型的国家电力发展综合评价过程如图 1 所示。

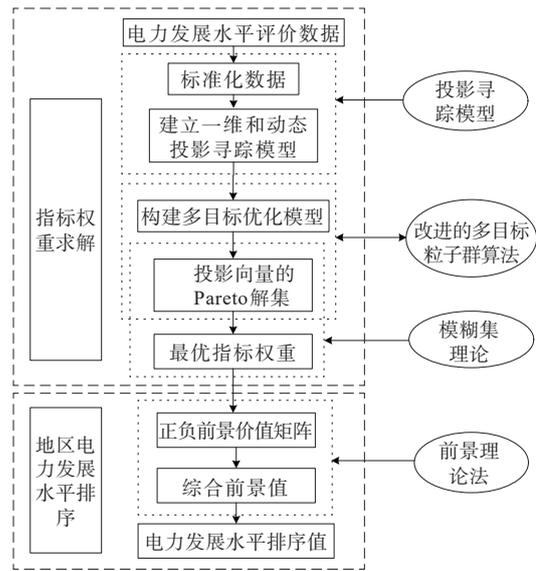


图 1 电力发展水平评价模型框架

Figure 1 The framework for evaluating level of power development

4 实验验证

4.1 方法的有效性

实验环境: PC (Intel (R) Core™ i5-11260H, 2.60 GHz CPU, 8 GB RAM), 操作系统 (Windows 10), 试验软件 (Pycharm, MATLAB 2020b), 编程语言 (Python 语言、m 语言)。

根据表 1 选取的 17 个电力发展水平评价指标, 得到 11 个国家的原始电力发展水平评价数据, 结果见表 2。根据式(16)~(17), 得到线性标准化电力发展水平评价矩阵 B 。

$$B^T = \begin{bmatrix} 0.691 & 0.062 & 0.007 & 0.010 & 0.050 & 0.060 & 0.000 & 1.000 & 0.177 & 0.147 & 0.046 \\ 0.717 & 0.043 & 0.000 & 0.014 & 0.035 & 0.084 & 0.019 & 1.000 & 0.162 & 0.165 & 0.019 \\ 0.595 & 0.898 & 0.878 & 0.899 & 1.000 & 0.447 & 0.840 & 0.090 & 0.000 & 0.564 & 0.453 \\ 0.942 & 0.904 & 0.000 & 0.971 & 0.971 & 0.932 & 0.423 & 1.000 & 0.865 & 0.231 & 0.712 \\ 0.527 & 0.115 & 1.000 & 0.690 & 0.063 & 0.175 & 0.288 & 0.000 & 0.037 & 0.637 & 0.346 \\ 0.097 & 1.000 & 0.148 & 0.023 & 0.185 & 0.049 & 0.237 & 0.362 & 0.143 & 0.123 & 0.000 \\ 0.251 & 0.190 & 0.023 & 0.274 & 1.000 & 0.161 & 0.276 & 0.024 & 0.013 & 0.000 & 0.384 \\ 0.286 & 0.246 & 0.166 & 0.611 & 0.206 & 0.674 & 1.000 & 0.200 & 0.154 & 0.017 & 0.000 \\ 0.172 & 0.069 & 0.000 & 0.517 & 0.241 & 1.000 & 0.483 & 0.190 & 0.155 & 0.828 & 0.138 \\ 0.120 & 0.187 & 0.000 & 1.000 & 0.053 & 0.868 & 0.173 & 0.067 & 0.307 & 0.120 & 0.067 \\ 0.134 & 0.110 & 0.451 & 0.000 & 0.146 & 0.000 & 0.256 & 1.000 & 0.805 & 0.134 & 0.890 \\ 0.844 & 1.000 & 0.084 & 0.292 & 0.448 & 0.431 & 0.324 & 0.230 & 0.000 & 0.490 & 0.681 \\ 0.755 & 0.633 & 0.780 & 1.000 & 0.898 & 0.939 & 0.898 & 0.000 & 0.224 & 0.890 & 0.408 \\ 0.439 & 0.432 & 0.045 & 0.258 & 0.980 & 0.471 & 0.710 & 0.381 & 0.000 & 1.000 & 0.555 \\ 0.468 & 0.540 & 0.258 & 0.411 & 0.758 & 0.363 & 0.766 & 0.557 & 0.000 & 1.000 & 0.718 \\ 0.000 & 0.001 & 0.862 & 0.700 & 0.780 & 0.476 & 0.699 & 0.641 & 1.000 & 0.472 & 0.165 \\ 0.785 & 0.771 & 0.701 & 0.965 & 1.000 & 0.903 & 0.912 & 0.000 & 0.101 & 0.907 & 0.534 \end{bmatrix}$$

表2 电力发展的指标值^[7]

Table 2 The indicator values of power development

国家	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₉	y ₁₀	y ₁₁	y ₁₂	y ₁₃	y ₁₄	y ₁₅	y ₁₆	y ₁₇
s ₁ (美国)	4 083	1 197	31.4	0.8	32.9	6.8	19.5	5.3	1.1	1.4	1.7	12 814	0.24	44.1	21.4	15.85	3.02
s ₂ (加拿大)	601	143	9.3	1.2	9.3	58.0	15.2	4.6	0.5	1.9	1.5	15 004	0.30	44.0	22.3	15.83	3.15
s ₃ (墨西哥)	298	75	10.8	10.6	60.0	9.6	3.3	3.2	0.1	0.5	4.3	2 116	0.22	38.0	18.8	3.66	3.77
s ₄ (英国)	312	97	9.3	0.5	42.2	2.5	21.1	11.0	3.1	8.0	0.6	5 030	0.12	41.3	20.7	5.95	1.42
s ₅ (法国)	533	131	1.9	0.5	6.3	11.7	72.6	3.9	1.5	0.9	1.8	7 237	0.17	52.5	25.0	4.82	1.11
s ₆ (德国)	590	207	42.2	0.9	12.7	4.0	13.1	12.1	5.9	7.0	0.6	6 995	0.15	44.6	20.1	9.12	1.97
s ₇ (西班牙)	256	105	13.6	6.2	19.2	14.5	21.3	17.8	2.9	1.8	2.7	5 489	0.17	48.3	25.1	5.96	1.89
s ₈ (中国)	5 794	1 639	68.2	0.2	2.7	19.2	3.4	3.8	1.2	1.0	8.8	4 161	0.61	43.2	22.5	6.78	10.01
s ₉ (印度)	1 236	329	74.8	1.6	4.8	9.3	2.6	3.0	1.0	2.8	7.2	926	0.50	37.3	15.6	1.70	9.11
s ₁₀ (日本)	1 073	333	33.7	8.2	39.2	8.2	1.7	0.6	4.9	1.4	1.7	7 818	0.17	52.8	28.0	9.17	1.94
s ₁₁ (韩国)	516	105	41.8	3.2	22.5	1.2	28.9	0.3	0.9	1.0	7.9	10 522	0.41	45.9	24.5	13.52	5.26

将指标权重假设为一组变量 $W = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$, 根据标准化评价矩阵 B 和式(18)~(20)构造投影寻踪多目标优化函数。一维投影寻踪模型指标函数最大化与基于动态聚类的投影寻踪模型指标函数最大化。采用改进多目标粒子群算法进行种群初始化, 并对粒子进行最优解与 Pareto 非劣解集更新运算, 不断寻优, 得到最优投影向量 Pareto 解集, 如图 2 所示。

在种群数目、迭代次数和目标函数约束条件相同情况下, 应用常规多目标粒子群算法(MOPSO)^[22]

和非支配遗传算法 2(NSGA-II)^[27]得到的 Pareto 最优前沿, 分别如图 3、4 所示。

从图 2~4 可以看出, NSGA-II 未能找到多目标优化问题的 Pareto 最优前沿解, 而本文算法可得到比常规 MOPSO 算法解更光滑、更均匀的 Pareto 最优前沿; 同时本文算法得到的最优前沿解要比其余 2 种算法得到的最优前沿解更完整。

在利用 M-PP 法和式(18)~(20)得到最佳投影向量的 Pareto 解集之后, 再利用式(21)、(22)的模

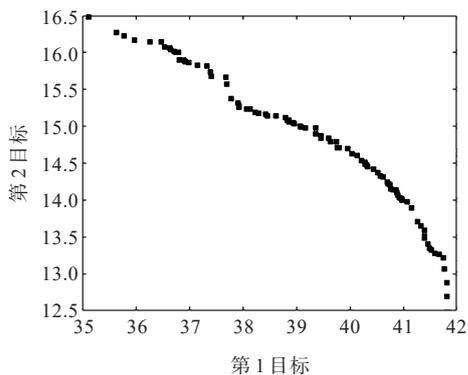


图 2 IMOPSO 算法优化后的 Pareto 前沿

Figure 2 The Pareto front optimized by IMOPSO algorithm

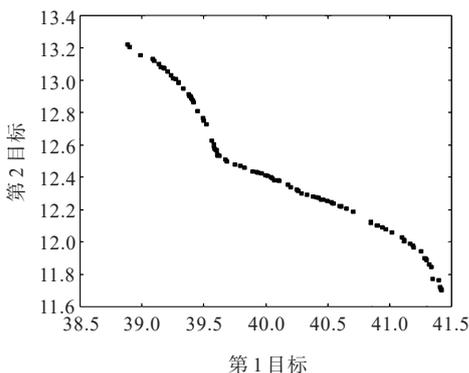


图 3 MOPSO 算法优化后的 Pareto 前沿

Figure 3 The Pareto front optimized by MOPSO algorithm

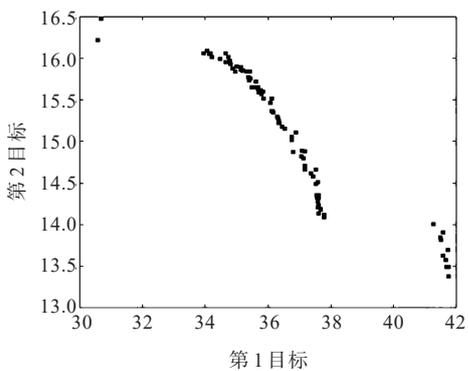


图 4 NSGA-II 算法优化后的 Pareto 前沿

Figure 4 Pareto front optimized by NSGA-II algorithm

糊综合评价法,得到最佳投影方向向量。该折中最佳投影向量为

$$a = [0.464 \ 0.489 \ -0.437 \ 0.279 \ -0.319 \ 0.150 \ -0.288 \ -0.154 \ -0.253 \ -0.250 \ 0.621 \ -0.194 \ -0.592 \ -0.189 \ -0.114 \ 0.208 \ -0.561]^T$$

由式(23)~(24)计算得到电力发展水平的指标权重向量 w :

$$w = [0.083 \ 0.087 \ 0.079 \ 0.050 \ 0.057 \ 0.027 \ 0.051 \ 0.028 \ 0.045 \ 0.045 \ 0.112 \ 0.034 \ 0.106 \ 0.034 \ 0.021 \ 0.037 \ 0.101]^T$$

根据式(25)、(26)构造正、负前景价值矩阵 V^+ 和 V^- ,由式(29)计算各个国家的电力发展水平的综合前景值 V 。最后,根据式(30)计算出各个国家的电力发展水平的综合评价价值,结果见表 3。

表 3 各方案的综合评分值

Table 3 Comprehensive scores of each scheme

国家	电力发展水平前景值 V	电力发展水平评分值 D	排序结果
s_1 (美国)	-1.247	0.861	3
s_2 (加拿大)	-1.764	0.575	8
s_3 (墨西哥)	-2.139	0.367	10
s_4 (英国)	-1.037	0.977	2
s_5 (法国)	-0.996	1.000	1
s_6 (德国)	-1.370	0.793	5
s_7 (西班牙)	-1.317	0.822	4
s_8 (中国)	-1.735	0.591	7
s_9 (印度)	-2.804	0.000	11
s_{10} (日本)	-1.472	0.736	6
s_{11} (韩国)	-2.040	0.422	9

根据综合评价价值的大小可以得到这 11 个国家的电力发展水平的优劣顺序为 $s_5 > s_4 > s_1 > s_7 > s_6 > s_{10} > s_8 > s_2 > s_{11} > s_3 > s_9$ 。由该排序结果可知, s_5 (法国)是综合电力发展水平相对最好的国家。通过分析法国的电力发展水平数据可看出: s_5 (法国)不仅在成本性指标、燃煤发电份额、石油发电份额和人均二氧化碳排放量中表现突出,还在效益型指标总发电量上处于优势地位。 s_9 (印度)是综合电力发展水平相对最差的国家。通过分析该国的电力发展数据发现: s_9 (印度)的 17 个指标值大多数处于 11 个国家中的较低水平。而中国电力发展与世界一些发达国家相比还存在一定差距。

4.2 电力发展水平评价方法比较

从现有的研究中选取具有代表性的电力发展水平评价方法与本文方法进行比较。选取作为比较的电力发展水平评价方法有:基于熵权法^[7]和简单线性加权^[28]的电力发展水平评价方法(entropy weight simple linear weight based electric power development level evaluation method, EW-S)、基于遗传算法优化投影寻踪^[29]和简单线性加权的电力发展评价方法(genetic algorithm and projection pursuit

simple linear weight based electric power development level evaluation method, GA-S)、基于动态投影寻踪和简单线性加权的评价方法的电力发展水平评价方法 (genetic algorithm and dynamic projection pursuit simple linear weight based electric power level development evaluation method, GAD-S)、基于变异系数法和 TOPSIS 的评价方法 (coefficient of variation-topsis based electric power level development evaluation method, CV-T)、基于云模型、熵权法和 TOPSIS 的评价方法 (cloud model and entropy method and TOPSIS, CM-T)。通过编程实现了电力发展水平评价方法 EW-S、GA-S、GAD-S、CV-T 和 CM-T。表 4 给出了 M-PP、EW-S、GA-S、GAD-S、CV-T 和 CM-ET 方法的电力发展水平排序结果。

表 4 不同评价方法的方案排序值

Table 4 Scheme ranking values of different evaluation methods

国家	M-PP	EW-S	GA-S	GAD-S	CV-T	CM-T
s ₁	3	2	6	6	2	3
s ₂	8	8	8	7	8	8
s ₃	10	11	9	10	10	10
s ₄	2	3	4	5	3	7
s ₅	1	5	1	1	4	1
s ₆	5	4	5	4	5	5
s ₇	4	6	2	2	6	4
s ₈	7	1	7	9	1	9
s ₉	11	10	11	11	11	11
s ₁₀	6	7	3	3	7	2
s ₁₁	9	9	10	8	9	6

采用文献[30]提出的平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 方法, 对本文方法与其他 5 种方法进行比较。E_{MAE} 的表达式为

$$E_{MAE}(X_i, X_k) = \frac{\sum_{j=1}^{\mu} |X_{ij} - X_{kj}|}{\mu} \quad (31)$$

式中, X_i 为第 i 个电力发展水平评价方法的排序向量; E_{MAE}(X_i, X_k) 为排序向量 X_i 和 X_k 之间的平均绝对偏差; X_{ij} 为第 i 个电力发展水平评价方法在第 j 个方案上排序值; μ 为方案总数。

如果某 2 种方法的平均误差值越小, 则这 2 种方法的排序结果越接近。表 5 给出了不同方法的 E_{MAE} 值。M-PP 的平均 E_{MAE} 值为 2.056, EW-S、GA-S、GAD-S、CV-T 和 CM-T 的平均 E_{MAE} 值分别

为 3.056、2.444、2.611、2.667 和 2.722。M-PP 的平均 E_{MAE} 值小于其他 5 种方法的。因此, 本文提出的电力发展水平评价方法 M-PP 的准确性在这 6 种方法中最高。

表 5 不同评价方法的 E_{MAE} 值

Table 5 E_{MAE} values of different evaluation methods

评价方法	不同评价方法的 E _{MAE}					
	M-PP	EW-S	GA-S	GAD-S	CV-T	CM-T
M-PP	0.000	3.000	2.000	2.667	2.333	2.333
EW-S	3.000	0.000	4.667	5.000	0.667	5.000
GA-S	2.000	4.667	0.000	1.333	4.000	2.667
GAD-S	2.667	5.000	1.333	0.000	4.667	2.000
CV-T	2.333	0.667	4.000	4.667	0.000	4.333
CM-ET	2.333	5.000	2.667	2.000	4.333	0.000

MAE 从排序向量的角度对评价方法的准确性进行比较, 皮尔逊相关系数^[31] 则从评分向量的角度对评价方法的准确性进行比较。皮尔逊相关系数的计算式为

$$\rho_{C_i, C_k} = \frac{\sum_{j=1}^m C_{ij} C_{kj} - \frac{\sum_{j=1}^m C_{ij} \sum_{j=1}^m C_{kj}}{m}}{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^m (C_{ij})^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^m C_{ij} \right)^2}{m} \right] \left[\sum_{j=1}^m (C_{kj})^2 - \frac{\left(\sum_{j=1}^m C_{kj} \right)^2}{m} \right]}} \quad (32)$$

式中, C_i 为第 i 种评价方法的评分向量; ρ_{C_i, C_k} 为第 i 种方法与第 k 种方法的皮尔逊相关系数值; C_{ij} 为第 i 种评价方法中第 j 个方案的评分值; m 为方案数量。

为使比较结果的可信度更高, 本文计算了这些评价方法间评分值, 结果见表 6, 不同评价方法的皮尔逊相关系数见表 7。

由表 7 可知, 本文所提方法与其他 5 种方法之间的皮尔逊相关系数分别为 0.665、0.947、0.941、0.838、0.867, 其均值为 0.876; EW-S、GA-S、GAD-S、CV-T 和 CM-T 的均值分别为 0.710、0.856、0.842、0.821、0.809。M-PP 的均值大于其他 5 种方法, 这说明本文所提方法与其他方法之间的评分相似性高于其他 5 种方法的。因此, 根据皮尔逊相关系数的计算结果, 在 6 种电力发展水平评价方法中, 本文所提方法 M-PP 是最优的。

表6 不同评价方法的方案评分值

Table 6 Scheme score values from different evaluation methods

国家	不同评价方法的方案评分值					
	M-PP	EW-S	GA-S	GAD-S	CV-T	CM-T
s ₁	0.861	0.426	0.509	0.466	0.391	0.682
s ₂	0.575	0.310	0.409	0.412	0.309	0.473
s ₃	0.367	0.227	0.395	0.313	0.203	0.354
s ₄	0.977	0.378	0.55	0.499	0.388	0.500
s ₅	1.000	0.356	0.563	0.546	0.375	0.742
s ₆	0.793	0.362	0.524	0.510	0.359	0.610
s ₇	0.822	0.348	0.56	0.534	0.343	0.661
s ₈	0.591	0.476	0.454	0.372	0.431	0.470
s ₉	0.000	0.231	0.308	0.200	0.161	0.039
s ₁₀	0.736	0.324	0.551	0.526	0.312	0.726
s ₁₁	0.422	0.265	0.389	0.383	0.217	0.525

表7 不同评价方法的皮尔逊相关系数

Table 7 The Pearson correlation coefficients of different evaluation methods

评价方法	不同评价方法的皮尔逊相关系数					
	C _{M-PP}	C _{EW-S}	C _{GA-S}	C _{GAD-S}	C _{CV-T}	C _{CM-T}
M-PP	1.000	0.665	0.947	0.941	0.838	0.867
EW-S	0.665	1.000	0.600	0.514	0.952	0.526
GA-S	0.947	0.600	1.000	0.957	0.766	0.865
GAD-S	0.941	0.514	0.957	1.000	0.706	0.932
CV-T	0.838	0.952	0.766	0.706	1.000	0.665
CM-T	0.867	0.526	0.865	0.932	0.665	1.000

最后,本文采用离差法对本文的方法与其他5种评价方法进行决策灵敏度分析。某方法的离差越大,该方法区分国家电力发展水平能力越好。决策灵敏度值的计算式为

$$L = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (v_i - \bar{v})^2}{m}} \quad (33)$$

式中, L 为决策灵敏度; v_i 第*i*个国家的电力发展水平的评价值; \bar{v} 为所有国家电力发展水平的评价均值; m 为国家总数。

不同方法的决策灵敏度计算结果见表8。

表8 不同方法的决策灵敏度值

Table 8 The decision sensitivity values of different methods

评价方法	决策灵敏度/%
M-PP	28.53
EW-S	7.53
GA-S	8.33
GAD-S	10.37
CV-T	8.35
CV-T	19.30

由表8可知,本文所提方法的决策灵敏度值均大于其他5种方法的。由此可说明本文所提方法对国家电力发展水平的区分效果优于其他5种方法的,本文方法是有效的。

5 结语

本文对国家电力发展水平的评价问题进行了研究,提出了一种基于改进多目标粒子群算法优化投影寻踪的国家电力发展水平评价方法。改进的多目标粒子群算法可以保持Pareto最优解集多样性、解决粒子容易陷入局部最优和Pareto最优前沿分布不均等问题,从而有效求解投影向量Pareto解集;通过对投影向量的Pareto解集进行模糊决策方法和归一化方法获得各个指标的权重;采用前景理论方法实现国家电力发展水平的完全排序。基于这11个国家的电力发展水平数据集,验证了本文所提方法,并与4种具有代表性的电力发展水平评价方法进行了比较。实验结果表明:本文方法可以得到较为满意的排序结果,其评价准确性优于其他方法的。本文提出的电力发展水平评价方法进一步丰富了电力发展水平评价的理论体系。

通过对电力发展现状进行综合评价,国家可以明确自身电力发展的优点与缺点,把握国家电力发展的整体情况,更有针对性地对电力工业发展进行规划。从这11个国家电力发展综合排名结果来看,中国的电力发展与世界一些发达国家相比还存在一定差距。中国要实现“双碳”目标,能源是主战场,新型电力系统是主力军。中国新型电力系统应以发展新能源供给消纳体系建设为主线任务,大力发展清洁能源,以源网荷储多向协同、灵活互动为有力支撑,建立智能、柔性的电力系统。与此同时,清洁能源也应聚焦大容量风电、高效光伏、大容量储能、低成本可再生能源制氢及提高核能发电的稳定性。

参考文献:

- [1] 郝如海,智勇,祁莹,等.基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):73-78.
HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 73-78.
- [2] SHI K F, CHEN Y, YU B L, et al. Modeling spatiotemporal

- CO₂ (carbon dioxide) emission dynamics in China from DMSP-OLS nighttime stable light data using panel data analysis[J]. *Applied Energy*, 2016, 168: 523-533.
- [3] KONG X, WANG H Y, LI N, et al. Multi-objective optimal allocation and performance evaluation for energy storage in energy systems[J]. *Energy*, 2022, 253: 124061.
- [4] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. *发电技术*, 2023, 44(4): 484-491.
XU Honghua, SHAO Guiping, E Chunliang, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(4): 484-491.
- [5] QIAN J X, WU J H, YAO L, et al. Comprehensive performance evaluation of Wind-Solar-CCHP system based on energy analysis and multi-objective decision method[J]. *Energy*, 2021, 230: 120779.
- [6] CHEN C, LONG H L, ZENG X T. Planning a sustainable urban electric power system with considering effects of new energy resources and clean production levels under uncertainty: a case study of Tianjin, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 173: 67-81.
- [7] ZHAO D F, LI C B, WANG Q Q, et al. Comprehensive evaluation of national electric power development based on cloud model and entropy method and TOPSIS: a case study in 11 countries[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123190.
- [8] ZHOU Y, ZHOU N R, GONG L H, et al. Prediction of photovoltaic power output based on similar day analysis, genetic algorithm and extreme learning machine[J]. *Energy*, 2020, 204: 117894.
- [9] 孙彦龙, 康重庆, 陈宋宋, 等. 低碳电网评价指标体系与方法[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 157-162.
SUN Yanlong, KANG Chongqing, CHEN Songsong, et al. Low-carbon power grid index system and evaluation method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(17): 157-162.
- [10] 李君卫, 余洋, 蒋衍君, 等. 面向电网调峰的负荷友好性评价[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(20): 115-124.
LI Junwei, YU Yang, JIANG Yanjun, et al. Load friendliness evaluation for peak regulation of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(20): 115-124.
- [11] HE Y X, PANG Y X, ZHANG Q, et al. Comprehensive evaluation of regional clean energy development levels based on principal component analysis and rough set theory[J]. *Renewable Energy*, 2018, 122: 643-653.
- [12] 李星梅, 钟志鸣, 阎洁. 大规模风电接入下的火电机组灵活性改造规划[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(3): 51-57.
LI Xingmei, ZHONG Zhiming, YAN Jie. Flexibility reformation planning of thermal power units with large-scale integration of wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(3): 51-57.
- [13] 潘超, 王锦鹏, 包钰婷, 等. 考虑源荷侧灵活性资源的风光消纳互动调控[J]. *智慧电力*, 2023, 51(1): 1-8.
PAN Chao, WANG Jinpeng, BAO Yuting, et al. Interactive control of wind and photovoltaic power consumption considering source-load side flexible resources[J]. *Smart Power*, 2023, 51(1): 1-8.
- [14] ADEFARATI T, BANSAL R C. Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources[J]. *Applied Energy*, 2019, 236: 1089-1114.
- [15] 朱天瞳, 丁坚勇, 郑旭. 基于改进TOPSIS法和德尔菲-熵权综合权重法的电网规划方案综合决策方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(12): 91-99.
ZHU Tiantong, DING Jianyong, ZHENG Xu. A comprehensive decision-making method for power network planning schemes based on the combination of the improved TOPSIS method with Delphi-entropy weight method[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(12): 91-99.
- [16] 马速良, 武亦文, 李建林, 等. 面向多服务目标需求的集中式电池储能优化配置方法研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(7): 75-86.
MA Suliang, WU Yiwen, LI Jianlin, et al. Research on optimal configuration of centralized battery energy storage for multiple service objectives[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(7): 75-86.
- [17] HE Y X, JIAO Z, YANG J. Comprehensive evaluation of global clean energy development index based on the improved entropy method[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 88: 305-321.
- [18] 乔龙, 楼文高, 高春昌. 一维投影寻踪聚类模型指标性质判断与实证研究[J]. *数学的实践与认识*, 2020, 50(17): 1-9.
QIAO Long, LOU Wengao, GAO Chunchang. Judgment of the attribute of indicator in one-dimension projection pursuit clustering model and its positive research[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2020, 50(17): 1-9.
- [19] 楼文高, 乔龙. 投影寻踪分类建模理论的新探索与实证研究[J]. *数理统计与管理*, 2015, 34(1): 47-58.
LOU Wengao, QIAO Long. New theory exploration of projection pursuit clustering model and its positive research[J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2015, 34(1): 47-58.
- [20] 冯茜, 李擎, 全威, 等. 多目标粒子群优化算法研究综述[J]. *工程科学学报*, 2021, 43(6): 745-753.
FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(6): 745-753.
- [21] 张冲, 荣娜. 基于改进粒子群算法的新能源侧储能容量配置[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(10): 98-105.
ZHANG Chong, RONG Na. Energy storage capacity allocation of renewable energy side based on improved

- particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(10): 98-105.
- [22] GHORBANI N, KASAEIAN A, TOOPSHEKAN A, et al. Optimizing a hybrid wind-PV-battery system using GA-PSO and MOPSO for reducing cost and increasing reliability[J]. Energy, 2018, 154: 581-591.
- [23] 陈志刚, 梁涤青, 邓小鸿, 等. Logistic混沌映射性能分析与改进[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1547-1551. CHEN Zhigang, LIANG Diqing, DENG Xiaohong, et al. Performance analysis and improvement of logistic chaotic mapping[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(6): 1547-1551.
- [24] 孙鹏, 罗明武, 孙朝霞, 等. 采用改进杜鹃搜索算法的主动配电网双层分布式风电规划方法[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2743-2751. SUN Peng, LUO Mingwu, SUN Zhaoxia, et al. An improved approach based on cuckoo search algorithm for bi-level distributed wind generation planning in active distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2743-2751.
- [25] 惠慧, 李蕊, 朱逸楠, 等. 含高比例分布式光伏的配电网多目标概率规划方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(11): 2-10. HUI Hui, LI Rui, ZHU Yidi, et al. Multi-objective probabilistic planning method for distribution network with high proportion of distributed photovoltaic[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11): 2-10.
- [26] 冷亚军, 岳鑫, 卢毅勤, 等. 基于最小叉熵与前景理论的综合能源系统评价方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(6): 40-45+90. LENG Yajun, YUE Xin, LU Yiqin, et al. Integrated energy system evaluation method based on minimum cross entropy and prospect theory[J]. Smart Power, 2021, 49(6): 40-45+90.
- [27] 邵一凡, 禹春霞, 禹嘉诚. 基于改进NSGA-II算法的云制造服务组合优化研究[J]. 运筹与管理, 2022, 31(11): 30-36. SHAO Yifan, YU Chunxia, YU Jiacheng. Cloud manufacturing service composition optimization based on improved NSGA-II algorithm[J]. Operations Research and Management Science, 2022, 31(11): 30-36.
- [28] 冷亚军, 吴宗育, 赵文会, 等. 基于近邻传播聚类权重的黑启动方案评估方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(13): 73-80. LENG Yajun, WU Zongyu, ZHAO Wenhui, et al. Assessment method of black-start scheme based on affinity propagation clustering weight[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13): 73-80.
- [29] 胡伟, 杨梓俊, 王瑾然, 等. 园区综合能源系统日前多目标优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 13-20. HU Wei, YANG Zijun, WANG Jinran, et al. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system in the industry park[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 13-20.
- [30] 冷亚军, 刘鹏飞, 时浩. 考虑不完全信息的电力系统黑启动方案评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6): 99-109. LENG Yajun, LIU Pengfei, SHI Hao. Evaluation method of power system black start scheme considering incomplete information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6): 99-109.
- [31] 于群, 霍筱东, 何剑, 等. 基于斯皮尔曼相关系数和系统惯量的中国电网停电事故趋势预测[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5372-5381. YU Qun, HUO Xiaodong, HE Jian, et al. Trend prediction of power blackout accidents in Chinese power grid based on Spearman's correlation coefficient and system inertia [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5372-5381.
-
- (上接第45页 Continued from page 45)
- [17] 曹锦, 陆飞, 江友华. 基于改进粒子群算法的配电网多目标优化控制[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 95-103. CAO Jin, LU Fei, JIANG Youhua. Multi-objective optimal control of distribution networks based on improved particle swarm algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 95-103.
- [18] 王渝红, 查云峰, 莫思特, 等. 一种嵌入制热材料的自制热导线临界融冰研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(7): 175-178+93. WANG Yuhong, ZHA Yunfeng, MO Site, et al. Study on critical ice melting of a self-made heating wire embedded with heating material[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(7): 175-178+93.
- [19] 党世轩, 王岩, 胡聪, 等. 110 kV输电线路巡检无人机电磁兼容分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 235-242. DANG Shixuan, WANG Yan, HU Cong, et al. Electromagnetic compatibility analysis of patrol UAV applied to 110 kV transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 235-242.
- [20] 陈远博, 郑可迪, 顾宇轩, 等. 考虑电化学模型的配电网侧光储系统分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(2): 37-47. CHEN Yuanbo, ZHENG Kedi, GU Yuxuan, et al. Distributed Optimal Dispatch for Photovoltaic-Battery Storage Systems of Distribution Networks Considering Electrochemical Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 37-47.
- [21] 袁肖雷, 周羽生, 王永安, 等. 基于电磁-热耦合场的输电线路高频激励融冰分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 103-109. YUAN Xiaolei, ZHOU Yusheng, WANG Yongan, et al. Analysis and calculation of high-frequency excitation de-icing for transmission lines based on electromagnetic and thermal coupling field[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 103-109.