第 40 卷　第 14 期　2016 年 7 月 25 日
DOI：10.7500/AEPS20160124002
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol.40 No.14 July 25，2016

基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法

张华一[1]，文福拴[1,2]，张　璨[3]，田春筝[4]

（1. 浙江大学电气工程学院，浙江省杭州市 310027；2. 文莱科技大学电机与电子工程系，斯里巴加湾 BE1410，文莱；3. 国网南京供电公司，江苏省南京市 210019；4. 国网河南省电力公司经济技术研究院，河南省郑州市 450052）

摘要：电网建设项目组合的投资决策属于多属性决策问题。现有投资决策方法一般将评价指标体系的属性用确定值描述，并对单个项目进行评估得到待选项目集。事实上，有些属性并不适合用确定值来描述；另一方面，有些项目之间存在相关性，这样按单个项目来确定待选项目集就未必合适。在此背景下，首先发展了针对确定型、区间型、概率型和模糊型 4 种数据类型指标的收益/损失及其概率的计算方法。为计及决策过程中决策者的心理因素和风险倾向的影响，将前景理论引入电网建设项目组合的投资决策之中。然后，基于差异化思想选择指标权重，并利用 VIKOR 这种多准则决策分析方法确定最优项目组合，避免了传统线性加权法用优质指标补偿劣质指标，从而可能导致所得到的最优项目组合中包含劣质指标的情况。最后，以某省级电力公司的电网建设项目组合的投资决策问题为例，说明了所述方法的可行性和有效性。

关键词：电力建设；项目组合；多属性决策；前景理论；差异化权重；VIKOR 法

0　引言

电力设备和线路的投资、规划和建设是保证电力系统安全和经济运行的基础。电网建设项目种类多、数量大，需要的投资巨大，而可用资金一般受限。这样，如何在满足资金约束的前提下选择最合适的项目对维持电力系统安全与经济运行，进而实现国民经济与环境的可持续发展都具有重要影响[1]。这就是电网建设项目组合的投资决策问题。

在过去的几十年间，国内外在电网建设项目组合投资决策方面已有大量研究，提出了一些决策模型和方法[2-7]。文献[2]选取了输电能力不足率、项目征地费用等多项基础性指标，并按这些指标集的特性归纳为紧迫性、利用率等多项二级指标以计算综合指标；之后，采用层次分析法建立各方案综合指标排序矩阵并应用灰色系统理论计算各方案对理想方案的关联度，以方案的决策值距层次分析法得到的排序值的偏差和与理想方案的关联度偏差之和最小为目标建立了计及风险的层次-关联综合优化决策模型。文献[3]按照每个项目的属性标签与约束条件的匹配程度进行筛选以改善求解效率，在可同时实施的项目中根据项目组合整体的计算数据进行二次筛选，适用于从数量庞大的项目库中筛选合适项目。文献[4]用损失电量量化建设项目可能带来的经济损失，建立了以配电系统运行过程中经济损失最小为目标的项目建设顺序优化模型。文献[5]在电网建设项目经济评估中考虑了电价波动，发展了计算项目风险的方法。文献[6]提出了项目迫切度概念，并以迫切度改善程度最大为目标建立电网改造优化模型，由此求得最优项目组合。文献[7]考虑了电网建设项目的动态过程，建立了多阶段决策的动态规划模型，但没有计及不确定性因素的影响，且在待决策项目数较多的情况下，这种方法的计算工作量较大。

上述文献从可靠性和经济性等不同方面对电网建设项目进行评估并建立了相应的投资决策模型，且有些模型已经得到实际应用。不过，现有研究尚存在下述问题：①由于电力系统是互联网络，项目之间存在关联性且其一般难以准确描述，对每个项目单纯考虑就难以评估其他项目建设对其各项指标的影响；②电网建设项目组合对电力系统的影响涉及多个方面，各指标的评价值未必都适合用确定性数据表示，应该根据指标特性采用合适的数据类型来描述；③现有的电网建设项目决策模型忽略了决策者心理因素的影响，决策者的知识和经验有一定的局限，这会影响决策者对风险的估量和态度，因此很有必要考虑决策者的心理因素对决策的影响；④传

收稿日期：2016-01-24；修回日期：2016-04-05。
上网日期：2016-06-01。
国家自然科学基金资助项目(51477151)。

统决策方法一般根据各指标值线性加权选取最优方案，如此得到的最优方案有可能包含某个或某些过劣指标值。

电网建设项目组合的评价指标通常涉及多个方面，既包含客观的定量统计数据，又包含决策者凭借知识和经验给出的有些主观性的判断数据，仅用单一类型数据无法合理表征不同指标的评价内容。可根据各指标的评价内容特征相应地采用确定型、区间型、概率型和模糊型等不同数据形式。前景理论由 Daniel Kahneman 和 Amos Tversky 在 1979 年提出，与常用的描述理性行为的期望效用理论不同，前景理论隶属于行为决策理论[8]。决策者在面对收益和损失时具有不同的风险偏好，在面对收益时，决策者为避免收益流失而小心翼翼，即表现为风险厌恶；在面对损失时，又由于“不甘心”，其往往会选择“赌一把”，即表现为风险偏好[9]。前景理论能够处理决策者面对收益和损失时的心理因素对决策结果的影响[10]，适用于解决建设项目组合决策问题。

在上述背景下，本文提出一种基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法。具体主要做了下述工作：①发展了针对多种数据类型指标的收益和损失及其相应概率的计算方法；②将前景理论引入电网建设项目组合决策之中，并利用差异性权重法为各指标分配权重；③利用 VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)这种多准则决策分析方法求取协调解。

1　电网建设项目组合评价指标的收益/损失及其概率

假定有 m 个项目组合和 n 个评价指标。设 x_{ij} 为第 i 个项目在第 j 个评价指标下的属性值，x_{ij} 可为确定型、区间型、概率型和模糊型 4 种数据类型之一。同时，属性值又可分为效益型和成本型两大类，对于效益型或成本型指标，其属性值分别越大或越小越好。决策者对得失的判断往往针对某种参考点来进行，即以相对值为基础。用 r_{ij} 和 d_{ij} 分别表示相对参考值的收益和损失，而 p_{ij} 和 l_{ij} 分别表示相对收益和相对损失的发生概率。

1.1　确定型指标的收益/损失及其概率

对于确定型属性值 x_{ij}，其归一化后的属性值用 y_{ij} 表示。令 $m_{\mathrm{U},j}=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m} x_{ij}$，$m_{\mathrm{L},j}=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m} x_{ij}$。若指标 j 为效益型，则 $y_{ij}=(x_{ij}-m_{\mathrm{L},j})/(m_{\mathrm{U},j}-m_{\mathrm{L},j})$；若其为成本型，则 $y_{ij}=(m_{\mathrm{U},j}-x_{ij})/(m_{\mathrm{U},j}-m_{\mathrm{L},j})$。对归一化后的指标 j，给定其参考值为 $y_{\mathrm{ref},j}=\sum\limits_{i=1}^{m} y_{ij}/m$。

若 $y_{ij}\geqslant y_{\mathrm{ref},j}$，则

$$\begin{cases} r_{ij}=y_{ij}-y_{\mathrm{ref},j} & p_{ij}=1 \\ d_{ij}=0 & l_{ij}=0 \end{cases} \tag{1}$$

若 $y_{ij}<y_{\mathrm{ref},j}$，则

$$\begin{cases} r_{ij}=0 & p_{ij}=0 \\ d_{ij}=y_{\mathrm{ref},j}-y_{ij} & l_{ij}=1 \end{cases} \tag{2}$$

1.2　区间型指标的收益/损失及其概率

区间数可以表征决策过程中定量数据的一种不确定性，能够对不确定的客观评价准则进行合理描述[11]。对于区间数形式的属性值 $x_{ij}=[x_{\mathrm{L},ij},x_{\mathrm{U},ij}]$，设 x_{ij} 在区间 $[x_{\mathrm{L},ij},x_{\mathrm{U},ij}]$ 上均匀分布，概率密度函数为 $f_{ij}=1/(x_{\mathrm{U},ij}-x_{\mathrm{L},ij})$。令 $m_{\mathrm{U},j}=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m} x_{\mathrm{U},ij}$，$m_{\mathrm{L},j}=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m} x_{\mathrm{L},ij}$。若指标 j 为效益型，则 $y=(x-m_{\mathrm{L},j})/(m_{\mathrm{U},j}-m_{\mathrm{L},j})$；若 j 为成本型，则 $y=(m_{\mathrm{U},j}-x)/(m_{\mathrm{U},j}-m_{\mathrm{L},j})$。归一化后的属性值 $y_{ij}=[y_{\mathrm{L},ij},y_{\mathrm{U},ij}]$，概率密度函数 $f_{ij}'=1/(y_{\mathrm{U},ij}-y_{\mathrm{L},ij})$。对归一化后的指标 j，选其参考值为 $y_{\mathrm{ref},j}=\left[\sum\limits_{i=1}^{m}(y_{\mathrm{U},ij}+y_{\mathrm{L},ij})/2\right]/m$。

若 $y_{\mathrm{L},ij}\geqslant y_{\mathrm{ref},j}$，则

$$\begin{cases} r_{ij}=\int_{y_{\mathrm{L},ij}}^{y_{\mathrm{U},ij}}(y_{ij}-y_{\mathrm{ref},j})f_{ij}'\mathrm{d}x & p_{ij}=1 \\ d_{ij}=0 & l_{ij}=0 \end{cases} \tag{3}$$

若 $y_{\mathrm{U},ij}\leqslant y_{\mathrm{ref},j}$，则

$$\begin{cases} r_{ij}=0 & p_{ij}=0 \\ d_{ij}=\int_{y_{\mathrm{L},ij}}^{y_{\mathrm{U},ij}}(y_{\mathrm{ref},j}-y_{ij})f_{ij}'\mathrm{d}x & l_{ij}=1 \end{cases} \tag{4}$$

若 $y_{\mathrm{L},ij}<y_{\mathrm{ref},j}<y_{\mathrm{U},ij}$，则

$$\begin{cases} r_{ij}=\int_{y_{\mathrm{ref},j}}^{y_{\mathrm{U},ij}}(y_{ij}-y_{\mathrm{ref},j})f_{ij}'\mathrm{d}x \\ \qquad\qquad p_{ij}=(y_{ij}-y_{\mathrm{ref},j})f_{ij}' \\ d_{ij}=\int_{y_{\mathrm{L},ij}}^{y_{\mathrm{ref},j}}(y_{\mathrm{ref},j}-y_{ij})f_{ij}'\mathrm{d}x \\ \qquad\qquad l_{ij}=(y_{\mathrm{ref},j}-y_{ij})f_{ij}' \end{cases} \tag{5}$$

1.3　概率型指标的收益/损失及其概率

对于概率型属性值 x_{ij}，设其满足正态分布，概率密度函数为 f_{ij}。虽然 x_{ij} 的范围为无穷大，但可由“3σ 原则”确定其集中范围，则可进一步转化为 $x_{ij}=[x_{\mathrm{L},ij},x_{\mathrm{U},ij}]$ 的形式，即转化为和区间型指标相同的形式[12]。其归一化方法、参考值的选择和收益/损失及其概率的计算与区间型指标形式相同。

1.4　模糊型指标的收益/损失及其概率

决策者有时会根据经验知识用简单熟悉的语言术语对某个指标进行评价，此时适合用模糊型来描述该指标，可采用三角模糊数将语言值转换为数学形式[13]。对于模糊型属性值 x_{ij}，三角模糊数形式的语言值 $x_{ij}=(a_{ij},b_{ij},c_{ij})$，$a_{ij}\leqslant b_{ij}\leqslant c_{ij}$，其隶属度函数如下：

$$\varphi_{ij}(x)=\begin{cases}0 & x<a_{ij},x>c_{ij}\\ \dfrac{x-a_{ij}}{b_{ij}-a_{ij}} & a_{ij}\leqslant x<b_{ij}\\ \dfrac{c_{ij}-x}{c_{ij}-b_{ij}} & b_{ij}\leqslant x\leqslant c_{ij}\end{cases}\tag{6}$$

令 $m_{\mathrm{U},j}=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant m}c_{ij}$，$m_{\mathrm{L},j}=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant m}a_{ij}$。若属性 j 为效益型，则 $y=(x-m_{\mathrm{L},j})/(m_{\mathrm{U},j}-m_{\mathrm{L},j})$；若 j 为成本型，则 $y=(m_{\mathrm{U},j}-x)/(m_{\mathrm{U},j}-m_{\mathrm{L},j})$。归一化后的指标 $y_{ij}=(a_{ij}',b_{ij}',c_{ij}')$，隶属度为 $\varphi_{ij}'(y)$。$\varphi_{ij}'(y)$的形式与 $\varphi_{ij}(x)$相同，如式(7)所示：

$$\varphi_{ij}'(y)=\begin{cases}0 & y<a_{ij}',y>c_{ij}'\\ \dfrac{y-a_{ij}'}{b_{ij}'-a_{ij}'} & a_{ij}'\leqslant y<b_{ij}'\\ \dfrac{c_{ij}'-y}{c_{ij}'-b_{ij}'} & b_{ij}'\leqslant y\leqslant c_{ij}'\end{cases}\tag{7}$$

可通过对 $\varphi_{ij}'(y)$ 做线性变换，将隶属度转化为概率密度函数，需使得 $\int_{-\infty}^{+\infty}m\varphi_{ij}'\mathrm{d}y=1$。因此，归一化后的三角模糊数形式 y_{ij} 的概率密度函数 $f_{ij}'=m\varphi_{ij}'$，其中 $m=2/(c_{ij}'-a_{ij}')$，分布函数 $F_{ij}'=\int_{-\infty}^{y}f_{ij}'(y)\mathrm{d}y$。指标 j 的参考值为 $y_{\mathrm{ref},j}=\sum\limits_{i=1}^{m}b_{ij}'/m$。

若 $a_{ij}'\geqslant y_{\mathrm{ref},j}$，则

$$\begin{cases}r_{ij}=\int_{a_{ij}'}^{c_{ij}'}(y_{ij}-y_{\mathrm{ref},j})f_{ij}'\mathrm{d}y & p_{ij}=1\\ d_{ij}=0 & l_{ij}=0\end{cases}\tag{8}$$

若 $c_{ij}'\leqslant y_{\mathrm{ref},j}$，则

$$\begin{cases}r_{ij}=0 & p_{ij}=0\\ d_{ij}=\int_{a_{ij}'}^{c_{ij}'}(y_{\mathrm{ref},j}-y_{ij})f_{ij}'\mathrm{d}y & l_{ij}=1\end{cases}\tag{9}$$

若 $a_{ij}'<y_{\mathrm{ref},j}<c_{ij}'$，则

$$\begin{cases}r_{ij}=\int_{y_{\mathrm{ref},j}}^{c_{ij}'}(y_{ij}-y_{\mathrm{ref},j})f_{ij}'\mathrm{d}y\\ \qquad\qquad p_{ij}=F(c_{ij}')-F(y_{\mathrm{ref},i})\\ d_{ij}=\int_{a_{ij}'}^{y_{\mathrm{ref},j}}(y_{\mathrm{ref},j}-y_{ij})f_{ij}'\mathrm{d}y\\ \qquad\qquad l_{ij}=F(y_{\mathrm{ref},i})-F(a_{ij}')\end{cases}\tag{10}$$

2　基于前景理论获取指标前景值

前景理论中用价值函数将相对收益/损失价值转化为决策价值。给定收益和损失价值函数[14]为：

$$\begin{cases}v_{\mathrm{r},ij}=(r_{ij})^{\alpha}\\ v_{\mathrm{d},ij}=-\lambda(-d_{ij})^{\beta}\end{cases}\tag{11}$$

式中：α 和 β 分别反映决策者对收益和损失的态度，表示价值函数的凹凸程度[15]，$0\leqslant\alpha\leqslant1$，$0\leqslant\beta\leqslant1$；$\lambda$ 反映决策者对损失的厌恶程度，$\lambda>1$。

将收益和损失的概率转化为决策权重[16]：

$$\begin{cases}\pi_{\mathrm{p},ij}(p_{ij})=\dfrac{(p_{ij})^{r}}{((p_{ij})^{r}+(1-p_{ij})^{r})^{\frac{1}{r}}}\\ \pi_{\mathrm{l},ij}(l_{ij})=\dfrac{(l_{ij})^{\mu}}{((l_{ij})^{\mu}+(1-l_{ij})^{\mu})^{\frac{1}{\mu}}}\end{cases}\tag{12}$$

式中：$\pi_{\mathrm{p},ij}$ 为风险收益的决策权重；$\pi_{\mathrm{l},ij}$ 为风险损失的决策权重；r 和 μ 分别为决策者面对收益风险和损失风险时的态度，表示概率权重函数的弯曲程度[15]。

项目组合 i 的指标 j 的前景值 v_{ij} 可定义为：

$$v_{ij}=\pi_{\mathrm{p},ij}p_{ij}+\pi_{\mathrm{l},ij}l_{ij}\tag{13}$$

3　权重计算

这里采用差异性权重法为各指标分配权重。这种方法利用指标间的差异性反映指标的重要程度，某一指标与其他指标越不相同则该指标区分项目组合优劣的作用就越大[17]。

定义指标间的差异性：

$$d_{ef}=\sum_{i=1}^{m}\frac{(v_{ie}-v_{if})^{2}}{m}\tag{14}$$

式中：d_{ef} 为第 e 个指标和第 f 个指标之间的差异性。

指标之间的平均差异性为：

$$\bar{d}_{f}=\sum_{e=1}^{n}\frac{d_{ef}}{n}\tag{15}$$

式中：$\bar{d}_{f}$ 为第 f 个指标的平均差异性。

指标 f 的权重为：

$$w_{f}=\frac{\bar{d}_{f}}{\sum\limits_{f=1}^{n}\bar{d}_{f}}\tag{16}$$

4　基于 VIKOR 法的项目组合选择方法

传统的决策方法，如简单加权法及在其基础上发展起来的一系列方法，均建立在完全补偿的假设基础之上，即一个方案的某指标无论多差都可用其他指标来补偿[18]。应用此类方法进行决策时，不需

要考虑是否有最差属性，只需考虑方案的总体水平。采用传统决策方法时，项目组合 i 的综合前景值 σ_i 可用式(17)求取：

$$\sigma_i = \sum_{j=1}^{n} v_{ij} w_j \tag{17}$$

然后，按照综合前景值的大小排序选择最优项目组合。事实上，采用线性加权法时需要满足下述前提[18]：①指标体系为树状结构，即每个下级指标只与一个上级指标相关联；②每两个属性都是相互独立的；③属性间可完全补偿，即一个方案的某属性无论多差都可用其他属性补偿。事实上，对于实际问题，未必总能满足属性间完全补偿这一要求，这样按照综合前景值的大小排序选择最优项目组合的方法就存在弊端。

在电网建设项目组合决策时，决策者通常希望在最终的方案中各指标属性值相对比较均衡，避免某个或某些属性过差。ELECTRE(elimination et choice translation reality)法和 PROMETHEE(preference ranking organization methods for enrichment evaluations)法[10]都不要求完全补偿，并引入偏好信息，克服了传统多属性决策中的完全补偿要求。不过，ELECTRE 法只追求个体遗憾度最小，而 PROMETHEE 法只追求群体效用最大。VIKOR 法[19]兼顾了这两种方法的优点，可以同时考虑个体遗憾度最小和群体效用最大[19]。

VIKOR 法是一种逼近理想点解的多属性决策方法[20]，通过最大化群体效用和最小化个体遗憾度对有限项目组合进行折中排序，进而得到项目组合各指标互相折中的妥协解[21]。在引入前景理论后，电网建设项目组合的评价指标属性值将由各指标的前景值代替，并全部转化为效益型指标。基于 VIKOR 法的项目组合选择方法[22]步骤如下。

步骤 1：采用下式计算最大化群体效用 S_i、最小化个体遗憾度 R_i 和综合值 Q_i，即

$$S_i = \sum_{j=1}^{m} w_j \frac{v_{\max,j} - v_{ij}}{v_{\max,j} - v_{\min,i}} \tag{18}$$

$$R_i = \max_j \left(w_j \frac{v_{\max,j} - v_{ij}}{v_{\max,j} - v_{\min,i}} \right) \tag{19}$$

$$Q_i = \eta \frac{S_i - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} + (1-\eta) \frac{R_i - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} \tag{20}$$

式中：$v_{\max,j} = \max\limits_{1 \leqslant i \leqslant m} v_{ij}$，$v_{\min,j} = \min\limits_{1 \leqslant i \leqslant m} v_{ij}$；$S_{\min} = \min\limits_i S_i$，$S_{\max} = \max\limits_i S_i$；$R_{\min} = \min\limits_i R_i$，$R_{\max} = \max\limits_i R_i$；$\eta$ 为决策者在最大化群体效用和最小化个体遗憾度之间的折中系数，取值在[0,1]之间。

步骤 2：由 S_i，R_i 和 Q_i 三个指标分别对备选项目组合从小到大进行排序，得到三个排序结果，分别代表备选项目组合在最大化群体效用、最小化个体遗憾度和综合方面的排序结果，且 S_i，R_i 和 Q_i 数值越小则代表该项目组合在这一方面越优。主要根据 Q_i 的值排序，而用 S_i 和 R_i 的值进行校验。

步骤 3：按照 Q_i 值递增对项目组合进行排序。设 A_i 为排名第 i 的项目组合，若综合值最小的项目组合 A_1 满足：①$Q(A_2) - Q(A_1) \geqslant D$，其中 $D = 1/(m-1)$；②A_1 依据 S_i 或 R_i 排序仍为最优，则 A_1 为最终选择的项目组合。否则，就按以下方法选取：若不满足条件①，则得到妥协解，可选择按综合值递增排列的项目组合 $A_1, A_2, \cdots, A_J$ 中的任一个，其中 A_J 为最后一个能满足 $Q(A_J) - Q(A_1) < D$ 的项目组合；若不满足条件②，则选择项目组合 A_1 或 A_2 中的任一个。

5　算例分析

针对某省级电力公司规划库中待选项目组合集进行投资决策。待决策项目均来自该省电力公司的电网滚动规划库，所有项目的技术可行性均已通过论证，而且通常以项目组合的方式投入建设[3]。某省电力公司下属的一个供电公司需在同一电压等级的 7 个电网建设项目组合中选择 1 个最优项目组合。为保证电网均衡发展，避免因未合理评价而错选项目组合进而影响系统整体发展，评价指标应尽可能充分全面；不仅要考虑建设项目自身的风险因素及其对电力系统的影响，而且要考虑项目实施过程对社会经济、环境、用户的影响。从电网建设项目组合的影响方面，可将评价指标分为五大类，即项目重要性指标、投资风险指标、技术发展指标、环境影响指标、社会福利指标。其中，项目重要性指标包括减少重载主变压器数和超限线路数等，环境影响指标则包括噪音和植被破坏面积等。电网建设项目组合的评价指标及其分类如表 1 所示。

表 1　电网建设项目组合的评价指标及其分类
Table 1　Evaluation indices and classifications for portfolio of construction projects in a power system

一级指标	二级指标	指标类型	数据类型	分类
项目重要性指标	减少重载主变压器数	定量	确定型	效益型
	减少超限线路数	定量	确定型	效益型
投资风险指标	风险等级	定性	模糊型	成本型
技术发展指标	项目技术创新水平	定性	模糊型	效益型
环境影响指标	噪音	定量	概率型	成本型
	植被破坏面积	定量	区间型	成本型
社会福利指标	新增就业岗位数	定量	确定型	效益型

项目组合和指标数据见附录 A 表 A1。其中，减少重载主变压器数和减少超限线路数均由确定型数据表示，施工过程产生的噪音由正态分布的随机数描述，施工过程中破坏的植被面积由区间型数据表示，项目的风险等级采用语言值进行评价并用数值型三角模糊数量化。其中，语言评价值“极低”“很低”“低”“较低”“稍低”“一般”“稍高”“较高”“高”“很高”“极高”所对应的三角模糊数分别给定为(0，0，0.1)，(0，0.1，0.2)，(0.1，0.2，0.3)，(0.2，0.3，0.4)，(0.3，0.4，0.5)，(0.4，0.5，0.6)，(0.5，0.6，0.7)，(0.6，0.7，0.8)，(0.7，0.8，0.9)，(0.8，0.9，1.0)，(0.9，1.0，1.0)。在上述指标中，减少重载主变压器数、减少超限线路数为效益型指标，其值越大越好；噪音、破坏植被面积、风险等级为成本型指标，其值越小越好。与前景理论有关的一些参数如 α，β，γ，μ 参照文献[15]的方法设定：$\alpha=\beta=0.88$，$\gamma=0.61$，$\mu=0.67$。

对指标值进行归一化处理，计算各指标的参考值，并求取指标值的收益和损失值及其对应的收益概率和损失概率。之后，采用价值函数将相对收益和相对损失转化为价值函数，进而通过权重函数将收益概率和损失概率转化为决策权重，最终得到各指标的前景值，如表 2 所示。

表 2　7 个待决策项目组合指标属性前景值

Table 2　Prospect values of indices of portfolio of seven candidate construction projects

项目组合	减少重载主变压器数/台	减少超限线路数/条	噪音/dB	破坏植被面积/m^2	风险等级	项目技术创新水平	新增就业岗位数/个	成本/万元
1	0.126 3	0.137 3	−0.635 2	0.282 8	0.332 1	0.109 4	0.037 3	−0.442 9
2	0.126 3	−0.512 7	0.527 2	−0.126 6	−0.641 6	0.289 9	−0.405 5	−0.632 8
3	0.633 5	0.282 8	−0.278 2	0.051 3	−0.296 9	−0.337 6	0.644 6	0.160 4
4	−0.424 3	−0.711 7	0.090 9	0.282 8	0.064 4	−0.560 2	−0.125 3	−0.240 6
5	0.126 3	−0.189 4	−0.172 5	−0.461 4	−0.073 9	0.434 4	0.232 4	0.421 8
6	−0.424 3	0.611 1	−0.461 4	−0.711 7	−0.296 9	−0.337 6	−0.270 6	0.661 3
7	−0.676 7	−0.189 4	0.357 9	0.282 8	0.443 4	−0.060 4	−0.659 2	−0.632 8
参考值	0.404 8	0.428 6	0.463 9	0.595 2	0.381 0	0.492 1	0.326 5	0.469 4
权重	0.113 9	0.134 8	0.160 6	0.135 3	0.100 5	0.089 3	0.106 6	0.158 9

由表 2 可见，前景值能细致刻画出各指标值相对于参考值的大小，决策者对位于参考值以下的指标值的厌恶程度由 λ 决定，这里取 λ 为 1.5。基于差异化思想得到的权重计算结果列于表 2 最后一行。

计算综合前景值和最大化群体效用、最小化个体遗憾度和综合值，结果如表 3 所示。

表 3　利用 VIKOR 法和线性加权法求得的 7 个待决策项目组合结果

Table 3　Attained results of portfolio of seven candidate construction projects employing VIKOR method and linear weighting method

项目组合	S	R	Q	综合前景值
1	0.513 52	0.160 61	0.713 70	−0.054 5
2	0.583 62	0.158 88	0.873 43	−0.170 1
3	0.427 60	0.111 28	0.084 26	0.106 9
4	0.622 49	0.134 77	0.766 99	−0.186 8
5	0.481 13	0.101 28	0.233 14	0.022 3
6	0.628 63	0.136 61	0.797 78	−0.119 5
7	0.564 57	0.158 88	0.826 06	−0.139 1

由表 3 可以看出，项目组合 3 的最大化群体效用和综合值均为最优，且满足 VIKOR 法的两个条件，因此应该选择该项目组合。结合表 2 和表 3 可以看出，项目组合 3 在减少重载主变压器数指标和减少超限线路数指标方面表现最好，在噪音指标、风险等级指标和指标项目技术创新水平指标方面虽不是最优，但并不存在最劣指标，因此该项目组合符合选择条件。采用几种方法得到的排序结果如下。

1)采用 VIKOR 法的排序结果：项目组合 3＞项目组合 5＞项目组合 1＞项目组合 4＞项目组合 6＞项目组合 7＞项目组合 2。

2)采用传统线性加权的综合前景值排序结果：项目组合 3＞项目组合 5＞项目组合 1＞项目组合 6＞项目组合 7＞项目组合 2＞项目组合 4。

3)按照最大化群体效用排序结果：项目组合 3＞项目组合 5＞项目组合 1＞项目组合 7＞项目组合 2＞项目组合 4＞项目组合 6。

4)按照最小化个体遗憾度排序结果：项目组合 5＞项目组合 3＞项目组合 4＞项目组合 6＞项目组合 7＝项目组合 2＞项目组合 1。

由上述结果可以看出，利用 VIKOR 法和线性加权法的决策结果均为项目组合 3，两者排序结果的差别主要在于：①在 VIKOR 法的结果中，项目组合 4 优于项目组合 6，7，2；②在线性加权法的结果中，项目组合 4 不如项目组合 6，7，2。这是因为项目组合 4 的个体遗憾度优于项目组合 6，7，2，即项目组合 4 在各个指标间比较均衡；而在基于线性加权法的综合前景值排序中，由于项目组合 6，7，2 中较差的指标被较好的指标补偿，所以从基于传统加

权法的前景值来看，项目组合 6，7，2 的排名较靠前。因此，VIKOR 法有效避免了传统线性加权法中用优质指标补偿劣质指标的问题。在按照最大化群体效用排序的结果中，最优的也是项目组合 3，因为该组合的整体优质指标较多。在按照最小化个体遗憾度排序的结果中，最优的是项目组合 5，次优是项目组合 3，这说明项目组合 3 的各个指标优劣也较为均衡，在个体遗憾度方面较好。因此综合来讲，最优的应为项目组合 3。

6　结语

本文研究了电网建设项目组合的多属性投资决策问题。在进行投资决策之前，需要对项目组合进行评价，而评价指标涉及多个方面，且指标的数据类型可以是确定型、区间型、概率型和模糊型等多种。本文提出了一种基于前景理论和 VIKOR 法的多属性电网建设项目组合决策方法。首先，建立了容纳 4 种数据类型的电网建设项目组合评价指标的收益/损失及其概率的计算方法。然后，基于前景理论计算出各指标的前景值，较细致地刻画了各个指标属性值的优劣程度，并利用差异性权重法计算各指标权重。为避免传统决策方法用优质指标补偿劣质指标的弊端，采用了 VIKOR 法进行决策，既考虑了综合水平又避免了最优项目组合存在劣质指标的问题。最后，以某省级电力公司项目组合投资决策问题为例对所述方法进行了验证。计算结果表明，所述方法能够有效处理多种类型的指标数据，并能计及决策者的心理因素和避免传统决策方法的完全补偿问题，最终获得综合最优的电网建设项目组合。

本文得到国网河南省电力公司科技项目(SGTYHT/13-JS-175)资助，谨此致谢！

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 徐东星.电网项目评价及综合决策优化[D].天津：天津大学，2012.

[2] 王文山.电网建设项目投资决策评价[J].电网技术，2007，31(增刊 2)：90-92.
WANG Wenshan. Decision-making evaluation in grid construction investment[J]. Power System Technology，2007，31(Supplement 2)：90-92.

[3] 葛少云，徐东星，刘洪，等.基于项目库的两阶段项目综合决策优化[J].电力系统保护与控制，2012，40(22)：118-123.
GE Shaoyun，XU Dongxing，LIU Hong，et al. A two-stage integrated decision optimization method based on the established project library[J]. Power System Protection and Control，2012，40(22)：118-123.

[4] 刘文霞，刘春雨，高丹丹.配电网建设项目优化模型及求解[J].电网技术，2011，35(5)：115-120.
LIU Wenxia，LIU Chunyu，GAO Dandan. Optimization model of distribution network construction project and its solution[J]. Power System Technology，2011，35(5)：115-120.

[5] 罗凤章，肖峻，王成山，等.计及电价波动的电网建设项目经济评估区间法[J].电网技术，2005，29(8)：20-24.
LUO Fengzhang，XIAO Jun，WANG Chengshan，et al. An interval economic evaluation method for projects of power system planning considering electricity price fluctuation[J]. Power System Technology，2005，29(8)：20-24.

[6] 荆昭霞，曾莉.基于改进层次分析法的配电网中压改造项目迫切度分析[J].电力系统自动化，2011，35(4)：92-95.
JING Zhaoxia，ZENG Li. Analysis on urgency degrees of distribution network reconstruction scheme based on advanced AHP[J]. Automation of Electric Power Systems，2011，35(4)：92-95.

[7] 黎灿兵，傅美平，梁锦照，等.基于网络协调程度评估的电网建设项目优化排序方法[J].电力系统保护与控制，2010，38(17)：112-115.
LI Canbing，FU Meiping，LIANG Jinzhao，et al. Optimization sequencing for grid construction projects based on evaluation of network coordination[J]. Power System Protection and Control，2010，38(17)：112-115.

[8] 杨建池，王运吉，钱大庆，等.基于前景理论的决策模型研究[J].系统仿真学报，2009，21(9)：2469-2472.
YANG Jianchi，WANG Yunji，QIAN Daqing，et al. Research on prospect theory-based decision model[J]. Journal of System Simulation，2009，21(9)：2469-2472.

[9] XIAO L，MANDAYAM，N B，POOR H V. Prospect theoretic analysis of energy exchange among micro grids[J]. IEEE Trans on Smart Grid，2015，6(1)：63-72.

[10] ZHOU F，JI Y J，JIAO R J. Prospect-theoretic modeling of customer affective-cognitive decision under uncertainty for user experience design[J]. IEEE Trans on Human-machine Systems，2014，44(4)：468-484.

[11] 王宏，林振智，文福拴，等.基于区间数的黑启动决策方法[J].电力系统自动化，2013，37(11)：26-32.
WANG Hong，LIN Zhenzhi，WEN Fushuan，et al. A black-start decision-making method based on interval values[J]. Automation of Electric Power Systems，2013，37(11)：26-32.

[12] 王芃，文福拴，王斐，等.基于混合多属性评价的错峰用电预案编制方法[J].电力系统自动化，2016，40(5)：54-61. DOI：10.7500/AEPS20150227001.
WANG Peng，WEN Fushuan，WANG Fei，et al. A hybrid multiple-attribute evaluation based scheduling method for peak load shifting[J]. Automation of Electric Power Systems，2016，40(5)：54-61. DOI：10.7500/AEPS20150227001.

[13] 袁宇，关涛，闫相斌，等.基于混合 VIKOR 方法的供应商选择决策模型[J].控制与决策，2014，29(3)：551-560.
YUAN Yu，GUAN Tao，YAN Xiangbin，et al. Based on hybrid VIKOR method decision making model for supplier

selection[J]. Control and Decision，2014，29(3)：551-560.
[14] 潘俊涛，彭建春，孙芊，等.基于前景理论的发电商电量分配策略[J].电网技术，2011，35(4)：170-175.
PAN Juntao，PENG Jianchun，SUN Qian，et al. A prospect theory-based generation energy allocation strategy for gencos [J]. Power System Technology，2011，35(4)：170-175.
[15] TVERSKY A，KAHNEMAN D. Advances in prospect theory：cumulative representation of uncertainty[J]. Journal of Risk and Uncertainty，1992，5(4)：297-323.
[16] 李如琦，唐林权，凌武能，等.基于云理论和前景理论的变压器状态维修风险决策[J].电力自动化设备，2013，33(2)：104-108.
LI Ruqi，TANG Linquan，LING Wuneng，et al. Risk decision-making based on cloud theory and prospect theory for conditional maintenance of power transformer [J]. Electric Power Automation Equipment，2013，33(2)：104-108.
[17] 冷亚军，陆青，张俊岭.基于差异性权重和协同过滤的黑启动方案评估[J].电力系统自动化，2015，39(20)：78-83. DOI：10.7500/AEPS20150128005.
LENG Yajun，LU Qing，ZHANG Junling. Assessment of black-start schemes based on difference weight and collaborative filtering [J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(20)：78-83. DOI：10.7500/AEPS20150128005.
[18] 岳超源.决策理论与方法[M].北京：科学出版社，2003.
[19] 索玮岚，樊治平.混合型多属性决策的 E-VIKOR 方法[J].系统工程，2010，28(4)：79-83.
SUO Weilan，FAN Zhiping. E-VIKOR method for hybrid multiple attribute decision making[J]. Systems Engineering，2010，28(4)：79-83.
[20] LIAO H C，XU Z S，ZENG X J. Hesitant fuzzy linguistic VIKOR method and its application in qualitative multiple criteria decision making[J]. IEEE Trans on Power Systems，2015，23(5)：1343-1355.
[21] OPRICOVIA S，TZENG G H. Compromise solution by MCDM methods：a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS[J]. European Journal of Operational Research，2004，156(2)：445-455.
[22] SAYADI M K，HEYDARI M，SHAHANAGHI K. Extension of VIKOR method for decision making problem with interval numbers[J]. Applied Mathematical Modelling，2008，33(2)：2257-2262.

张华一(1993—)，女，硕士研究生，主要研究方向：电力市场。E-mail：zhanghuayi1026@126.com

文福拴(1965—)，男，通信作者，教授，博士生导师，主要研究方向：电力系统故障诊断与系统恢复、电力经济与电力市场、智能电网与电动汽车等。E-mail：fushuan.wen@gmail.com

张　璨(1989—)，男，硕士，主要研究方向：电力系统恢复。E-mail：zhangcan1013@gmail.com

（编辑　章黎）

Prospect Theory Based Multiple-attribute Decision-making Method for Determining Portfolio of Construction Projects in Power Systems

ZHANG Huayi[1]，*WEN Fushuan*[1,2]，*ZHANG Can*[3]，*TIAN Chunzheng*[4]

(1. College of Electrical Engineering，Zhejiang University，Hangzhou 310027，China；
2. Department of Electrical and Electronic Engineering，Institut Teknologi Brunei，Bandar Seri Begawan BE1410，Brunei；
3. Sate Grid Nanjing Power Supply Company，Nanjing 210019，China；
4. Economic Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company，Zhengzhou 450052，China)

Abstract: Determining the most desirable portfolio of construction projects in a power system is a multiple-attribute decision-making problem. In traditional portfolio decision-making methods，the attribute values of indices are described as deterministic ones，and the optimal portfolio is selected from single projects ranked with the attribute values of the indices. However，it is not appropriate to represent some indices as deterministic quantities，and the optimal portfolio should not be selected based on the evaluations of single projects because of the possibility of having correlations among some single projects. Given this background，a method for computing the gains/losses and their probabilities of the indices with deterministic，interval，probabilistic，fuzzy types of data is first developed for the portfolio of construction projects. In order to deal with the impacts of psychology and risk preference of the decision-makers，the well-established prospect theory is next introduced to the portfolio decision-making problem. Then，the differentiations of weights are calculated for the indices and the optimal portfolio determined by employing the VIKOR (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) method，which can avoid the disadvantage of compensating the bad indices with good ones in traditional weighting methods. Finally，a sample example for a provincial power system is employed to demonstrate the feasibility and efficiency of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477151).

Key words: electric construction；portfolio of construction projects；multiple-attribute decision-making；prospect theory；differentiation of weights；VIKOR method