DOI: 10.7667/PSPC171537

# 基于供电分区的中高压配电网综合评价策略

田春筝[1]，殷奕恒[2]，关朝杰[1]，李秋燕[1]，杨 卓[1]，胡 钋[2]，杨丰阁[2]

(1. 国网河南省电力公司经济技术研究院，河南 郑州 450052；2. 武汉大学电气工程学院，湖北 武汉 430072)

**摘要：**传统的配电网规划综合评价方法缺乏对配电网不同区域特点的考虑，基于供电分区并结合中高压配电网规划特点建立了一套综合评估指标体系。在指标优化方面，根据传统灰色关联方法提出了通过核心指标来简化灰色关联度的计算过程，同时考虑到单独使用灰色关联理论会不利于指标间的相互独立性。因而综合应用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与灰色关联分析方法进行指标筛选，实现了指标优化与去冗余。引入层次分析法对熵权法的权重计算方法进行修改，使其权重更加合理。此外以最小距离和来设计目标函数，并利用拉格朗日函数从由 $k(k \geq 2)$ 种方法计算得到的权重中得到最优权重。以河南省某市 2015 年和 2016 年配电网规划的历史数据为例进行综合评估，表明该评价体系与方法能够合理地评估配电网整体发展水平，并找出薄弱环节，为配电网的规划、建设提供参考依据。

**关键词：**供电分区；改进灰色关联度；改进熵权；组合赋权

## Comprehensive evaluation strategy of medium and high voltage distribution network based on power supply division

TIAN Chunzheng[1], YIN Yiheng[2], GUAN Chaojie[1], LI Qiuyan[1], YANG Zhuo[1], HU Po[2], YANG Fengge[2]

(1. State Grid Henan Electric Power Company Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** For traditional distribution network planning comprehensive evaluation lacks consideration of characteristics of different distribution network areas, this paper establishes a comprehensive evaluation index system based on the power supply division and the characteristics of the medium and high voltage distribution network planning. In the aspect of index optimization, based on the traditional grey correlation method, core indices are proposed to simplify the calculation procedure of grey correlation degree. Analytic Hierarchy Process (AHP) and grey correlation analysis method are applied to screen indices and eliminate redundant indices, because only using grey correlation theory is not conducive to the independence of indices. The weight calculation method of entropy weight is modified by AHP to make the weight more reasonable. In addition, the objective function is designed by the minimum distance and the Lagrange function is used to get the optimal weight from the weight calculated by $k(k \geq 2)$ methods. A comprehensive evaluation is made by the historical data of distribution network planning in 2015 and 2016 in a city of Henan Province, illustrating that the evaluation system and method can evaluate the whole development level of the distribution network reasonably and find out the short slabs, which provides references for distribution network planning and construction.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567018).

**Key words:** power supply division; improved grey correlation degree; improved entropy weight; combination weighting

## 0 引言

配电网规划是配电网发展的重要基础，虽然国家电网公司已经制定了指导性很强的配电网规划导则，但是各地市公司仍然需要针对本地区特点和发展需求制定一套合理的配电网综合评价指标体系和评价方法。因此，对于国内各地市配电网，针对其普遍特点构建出一套具有系统性、独立性、完备性、可测性和可比性的配电网规划评价指标体系，并提出一种科学合理的评价方法是十分必要的。

**基金项目：**国家自然科学基金项目资助(51567018)

传统的配电网评价主要包括可靠性[1-3]、安全性[4]、供电质量[5-6]等，并未考虑反映区域配电网特点的指标，而且在指标选取方法上，往往是根据专家意见制定指标体系，因而指标之间的独立性以及指标体系的完备性等可能难以保证。在评价方法方面，文献[7]提出用组合赋权法来确定电能质量各技术性指标的权重，使其更加客观全面，在某种程度上改善了评估效果；文献[8]提出基于德尔菲法修正的层次分析法(AHP)设置评价体系各级指标权重，并将判断矩阵法用于措施层指标评分；文献[9-10]提出电网规划综合评判决策方法；文献[11]应用系统的量化综合评价理论，提出较为全面的城市配电网综合评价体系和方法。上述方法虽然从不同侧面、在不同程度上改善了配电网评价方法，但是关于配电网不同分区对指标优化、指标评分和综合评价等方面差异性的综合影响考虑不足。

本文基于国家电网公司制定的配电网供电分区标准对不同类型的供电区域进行差异化评价[12]，并结合中高压配电网规划特点建立了一套综合评估指标体系。由于指标优化中考虑不同分区的差异性导致计算量较大，因此引入德尔菲法与传统灰色关联度结合来简化后者的计算过程，即利用德尔菲法在每一个一级指标下的二级指标中确定一个或几个最能反映该一级指标特征的核心二级指标，并仅以这些指标作为参考指标，从而简化了传统灰色关联度的计算过程。考虑到单独使用灰色关联分析方法可能会删去一些独立性较强的指标，因此在指标筛选过程中，本文提出将层次分析法与灰色关联分析方法相结合，利用层次分析法赋权时对独立性不强的指标设置较小的权重，以消除指标冗余。此外，采用层次分析法对熵权法的权重计算方法进行修正，并通过以最小距离和为目标函数，利用拉格朗日函数从由 $k(k \geq 2)$ 种方法计算得到的权重中得到最优权重。综合应用层次分析法与改进熵权法求解指标权重的方法，弥补了单一权重计算方法在合理性上的不足，实现了对各指标权重的合理分配。

## 1　指标体系及其优化

### 1.1 指标体系

根据评价指标体系的构建原则，结合电网规划的特点和目的，本文制定的配电网规划评价指标体系如表 1 所示，共有 7 个一级指标，48 个二级指标，并且可根据区域电网特点进行逐级延展。

### 1.2 基于灰色关联理论的指标体系优化

灰色关联分析是灰色系统理论的主要内容，在解决不确定、贫信息系统的系统辨识、优势分析、聚类评估、模式识别和数据挖掘等方面具有显著优势[13-15]，应用较多。

**表 1 配电网规划评价指标体系**

Table 1 Evaluation index system of the distribution network planning

| 一级指标 | 二级指标 |
|---|---|
| 供电可靠性 | 主变 *N*-1 通过率 |
| | 线路 *N*-1 通过率 |
| | 变电站非经济区间负载率 |
| | …… |
| | 10 kV 架空网联络率 |
| 供电质量 | 供电半径超限率 |
| | 导线主干截面合格率 |
| | …… |
| | 配变无功配置比例 |
| 规划效用性 | 网络结构优化敏感度 |
| | 设备水平优化敏感度 |
| | …… |
| | 网络线损率 |
| 抗灾变能力 | 灾变停电时间 |
| | 灾变停电故障次数 |
| | 重要负荷灾变停电时间 |
| | …… |
| | 重要负荷灾变停电故障次数 |
| 规划协调性 | 负荷预测偏差率 |
| | 规划项目响应度 |
| | 容载比预测偏差率 |
| | …… |
| | 建设资金超额率 |
| 智能化发展水平 | 配电自动化率 |
| | 配电通信网络化率 |
| | …… |
| | 智能电表覆盖比例 |
| 环境和社会效益 | 电能替代效应 |
| | 电力增长 GDP |
| | …… |
| | 电力贡献弹性系数 |

传统灰色关联理论的基本思想是通过计算对象数据列与参考数据列的几何相似度，即灰色关联度来判断两者联系的紧密程度。若几何相似度越高，则两者关联度越大；反之亦然。因此，在筛选指标时，可以剔除指标关联度较小的指标，保留指标关联度较大的指标，从而确保各指标对于评价目标的一致性与准确性。

设评价对象为 $m$ 个，评价指标为 $n$ 个，对各指标数据进行无量纲化处理得到指标数据矩阵 $\boldsymbol{X}_{m\times n}=[\boldsymbol{x}_1,\boldsymbol{x}_2,\cdots,\boldsymbol{x}_n]$。参考数据列以第 1 列为例，

表示为 $\boldsymbol{x}_i = \boldsymbol{x}_1 = \{x_1(k) \mid k = 1, 2, \cdots, m\}$，比较数据列为 $\boldsymbol{x}_j = \{x_j(k) \mid j \neq i = 1, 2, \cdots, n;\ k = 1, 2, \cdots, m\}$，则 $\boldsymbol{x}_j$ 关于 $\boldsymbol{x}_1$ 的传统邓氏灰色关联度 $r_{1j}$ 可通过式(1)计算得到，即

$$\begin{cases} r_{1j} = \dfrac{1}{m}\sum\limits_{k=1}^{m}\xi_{1j}(x) \\ \Delta_{1j} = \left|x_1(k) - x_j(k)\right| \\ \Delta_{\min} = \min\limits_{1}\min\limits_{k}\left|x_1(k) - x_j(k)\right| \\ \Delta_{\max} = \max\limits_{i}\max\limits_{k}\left|x_1(k) - x_j(k)\right| \\ \xi_{1j}(x) = \dfrac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{1j} + \rho\Delta_{\max}} \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中，$\rho$ 一般取 0.5。式(1)为了考察同一一级指标下各二级指标之间的关联度，需要改变 $i$ 值对式(1)进行 $n$ 次重复计算。因此本文对这种计算方法进行简化，利用德尔菲法在二级指标中确定一个或几个核心指标，从而简化了传统灰色关联度计算过程。本文以供电可靠性为例，阐述利用核心指标筛选出关联度高的二级指标。通过德尔菲法确定的供电可靠性指标的核心指标为供电可靠率。利用式(1)以供电可靠率为参考数据列计算其余指标关于核心指标的灰色关联度。根据国网公司配电网规划技术导则的相关标准，结合河南省某市总体规划，将其供电区域分为 B、C、D 类。不同供电区域 2013—2016 年的部分供电可靠性指标同向化和无量纲化数据如表 2 所示。

**表 2 部分评价指标数据**

Table 2 Partial data of evaluation indices

| 供电可靠性相关指标 | 供电区域类别 | 2013 年 | 2014 年 | 2015 年 | 2016 年 |
|---|---|---|---|---|---|
| 主变 *N*-1 通过率 | B 类 | 0.747 | 1.070 | 1.094 | 1.090 |
| | C 类 | 0.873 | 0.972 | 1.043 | 1.113 |
| | D 类 | 0.860 | 0.995 | 1.054 | 1.092 |
| 线路 *N*-1 通过率 | B 类 | 0.897 | 0.946 | 1.091 | 1.067 |
| | C 类 | 0.898 | 0.949 | 1.054 | 1.099 |
| | D 类 | 0.824 | 0.963 | 1.022 | 1.091 |
| 变电站非经济区间负载率 | B 类 | 0.785 | 0.921 | 1.101 | 1.193 |
| | C 类 | 0.816 | 0.900 | 1.101 | 1.183 |
| | D 类 | 0.884 | 0.966 | 1.043 | 1.107 |
| 10 kV 线路非经济区间负载率 | B 类 | 0.983 | 0.998 | 0.996 | 1.023 |
| | C 类 | 0.851 | 0.919 | 1.035 | 1.195 |
| | D 类 | 0.941 | 0.974 | 1.022 | 1.063 |
| …… | …… | …… | …… | …… | …… |
| 10 kV 架空网联络率 | B 类 | 0.840 | 0.943 | 1.072 | 1.145 |
| | C 类 | 0.788 | 0.929 | 1.120 | 1.163 |
| | D 类 | 0.846 | 1.052 | 1.039 | 1.062 |
| 供电可靠率 | B 类 | 0.999 95 | 0.999 98 | 1.000 02 | 1.000 04 |
| | C 类 | 0.999 87 | 0.999 99 | 1.000 03 | 1.000 11 |
| | D 类 | 0.999 45 | 0.999 92 | 1.000 27 | 1.000 37 |

根据式(1)可以计算出供电可靠性下各二级指标对于核心指标的灰色关联度如表 3 所示。表 3 对比了未采用和采用核心指标的灰色关联度计算结果。

对上述两种方法得到的各指标灰色关联度进行大小排序，相同程度为 86%，说明本文提出的改进方法是合理的。由于灰色关联分析方法是通过各指标的灰色关联度大小排序来筛选指标，故而可能会将一些独立性较强的指标删除，无法保证各指标间的相互独立性。因此，本文提出在指标筛选过程中，将层次分析法与灰色关联分析方法相结合，利用层次分析法赋权时对独立性不强的指标设置较小的权重，以消去指标冗余。通过将各指标的灰色关联度 $r_i(i = 1, 2, \cdots, n)$ 与层次分析法的指标权重 $w_i'$ 相乘得到一个新关联度值 $r_i'$，并设置一个阈值 $t_h$，将 $r_i'$ 小于该值的指标删除以优化指标体系。

应用层次分析法(判断矩阵采用 0.1-0.9 标度法)[16]得到的供电可靠性指标权重如表 4 所示。

本文以 B 类分区为例计算供电可靠性指标 $r_i'$，结果如表 5 所示。

**表 3 供电可靠性指标灰色关联度数据**

Table 3 Grey correlation degree data of power supply reliability indices

| 二级指标 | 未采用核心指标的灰色关联度 | | | 采用核心指标的灰色关联度 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | B 类 | C 类 | D 类 | B 类 | C 类 | D 类 |
| 主变 *N*-1 通过率 | 0.636 | 0.652 | 0.679 | 0.554 | 0.714 | 0.756 |
| 线路 *N*-1 通过率 | 0.654 | 0.749 | 0.756 | 0.614 | 0.668 | 0.765 |
| 变电站非经济区间负载率 | 0.326 | 0.425 | 0.468 | 0.365 | 0.405 | 0.644 |
| 线路非经济区间负载率 | 0.746 | 0.497 | 0.461 | 0.635 | 0.519 | 0.677 |
| 变电站单线单变率 | 0.527 | 0.558 | 0.652 | 0.496 | 0.548 | 0.568 |
| 单辐射接线比例 | 0.732 | 0.601 | 0.47 | 0.615 | 0.649 | 0.495 |
| 非典型接线比例 | 0.615 | 0.475 | 0.663 | 0.52 | 0.497 | 0.582 |
| 中压配电网平均分段数 | 0.458 | 0.823 | 0.815 | 0.491 | 0.772 | 0.865 |
| 10 kV 电缆双环网率 | 0.579 | 0.362 | 0.491 | 0.53 | 0.222 | 0.418 |
| 10 kV 架空网联络率 | 0.409 | 0.438 | 0.615 | 0.557 | 0.473 | 0.636 |

**表 4 供电可靠性指标权重**

Table 4 Indices weight of power supply reliability

| 二级指标 | 主变 *N*-1 通过率 | 线路 *N*-1 通过率 | 变电站非经济区间负载率 | 线路非经济区间负载率 | 变电站单线单变率 |
|---|---|---|---|---|---|
| 权重 | 0.128 | 0.125 | 0.107 | 0.109 | 0.073 |
| 二级指标 | 单辐射接线比例 | 非典型接线比例 | 中压配电网平均分段数 | 10 kV 电缆双环网率 | 10 kV 架空网联络率 |
| 权重 | 0.092 | 0.089 | 0.097 | 0.071 | 0.109 |

**表 5 供电可靠性指标改进灰色关联度值**

Table 5 Improved grey correlation degree value of power supply indices

| 二级指标 | 主变 *N*-1 通过率 | 线路 *N*-1 通过率 | 线路非经济区间负载率 | 单辐射接线比例 | 10 kV 架空网联络率 |
|---|---|---|---|---|---|
| $r'$ | 0.071 | 0.076 | 0.069 | 0.056 | 0.050 |
| 二级指标 | 中压配电网平均分段数 | 非典型接线比例 | 变电站非经济区间负载率 | 10 kV 电缆双环网率 | 变电站单线单变率 |
| $r'$ | 0.048 | 0.046 | 0.039 | 0.038 | 0.036 |

设阈值 $t_h$ 为 0.04，将表 5 中 $r_i'\ (i=1,2,\cdots,10)$ 小于 0.04 的指标删去得到优化后的指标体系。其他二级指标均可应用该方法优化。

## 2　指标权重

### 2.1 层次分析法

1) 判断矩阵

采用 0.1-0.9 标度法构造判断矩阵。

2) 一致性检验

由于多阶判断的复杂性，判断矩阵中某些数值可能会出现前后矛盾的情况，为此需要对判断矩阵利用式(2)和式(3)进行一致性检验，即

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{2}$$

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{3}$$

式(2)和式(3)中：$n$ 为判断矩阵的阶数；$\lambda_{\max}$ 为最大特征值；$RI$ 为平均随机一致性指标。$CI$ 值越大，则判断矩阵的一致性越差。当 $CR<0.1$ 时，判断矩阵具有满意的一致性。若判断矩阵未通过一致性检验，需要对各指标间相互重要性程度重新进行赋值，直至其通过一致性检验。

3) 权重计算

若判断矩阵通过一致性检验，则其最大特征值对应的特征向量即为该指标相对于上一级指标的重要性排序，对其进行归一化处理后即可得到指标权重 $\boldsymbol{w}^{(1)}=[w_1^{(1)},w_2^{(1)},\cdots,w_n^{(1)}]$。

### 2.2 改进熵权法

1) 指标同向化和无量纲化

假设有 $m$ 个指标，每个指标对应 $n$ 个区域，得到初始矩阵 $\boldsymbol{Y}=(y_{ij})_{m\times n}$，其中 $y_{ij}$ 为第 $j$ 个区域的第 $i$ 个指标值。若 $m$ 个指标中有逆向指标(即数值越小越好)或适度指标(即中间某一段值最优)，则需将其转化为正向指标(即数值越大越好)[17]。对指标数据进行无量纲化处理得到指标数据的标准化矩阵为 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}$。

2) 权重计算

第 $i$ 个指标的熵值为

$$E_i=-k\sum_{i=1}^{m}x_{ij}\cdot\ln x_{ij} \tag{4}$$

式(4)中，为使 $0<E_i<1$，一般取 $k=1/\ln n$。

第 $i$ 个指标的熵权为

$$w_i^{(2)}=\frac{1-E_i}{m-\sum_{i-1}^{m}E_i} \tag{5}$$

3) 权重修正

传统熵权法是一种客观的权重计算方法，因此

其权重结果可能和层次分析法得到的主观权重有较大出入，并且与指标的重要性程度不相符。因此，本文对熵权法权重提出了一种修正方法：将层次分析法权重的最大值和最小值 $a$、$b$ 分别设为熵权法权重的上限和下限。由于通过层次分析法得到的指标权重已经能够很好地反映所设指标的重要性，因而这种设限可以使熵权法的权重与指标重要性程度保持一致，使权重处于合理的范围。

按照式(6)计算熵权法的第 $r(r=1,2,\cdots,m)$ 个指标的修正后权重 $w_r^{(2)*}$，对指标 $r$ 的权重修正量 $(w_r^{(2)}-w_r^{(2)*})$通过式(7)按权重比例分配到其余 $m-1$ 个指标中，即

$$w_r^{(2)*}=\begin{cases}a, & w_r^{(2)}>a\\ w_r^{(2)}, & b\le w_r^{(2)}\le a\\ b, & w_r^{(2)}<b\end{cases}\quad (r=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

$$w_s^{(2)*}=\begin{cases}w_s^{(2)}+(w_r^{(2)}-a)\cdot w_s^{(2)}\Big/\sum_s^m w_s^{(2)}, & w_r^{(2)}>a\\ w_s^{(2)}, & b\le \omega_r^{(2)}\le a\\ w_s^{(2)}+(w_r^{(2)}-b)\cdot w_s^{(2)}\Big/\sum_s^m w_s^{(2)}, & w_r^{(2)}<b\end{cases}\quad (s\ne r,\ s=1,2,\cdots,m) \tag{7}$$

由此得到各指标的修正权重向量 $\boldsymbol{w}^{(2)*}=[w_1^{(2)*},w_2^{(2)*},\cdots,w_m^{(2)*}]$。若 $\boldsymbol{w}^{(2)*}$ 中某个元素不在 $[a,b]$ 内，则继续按式(6)和式(7)计算，直到满足要求为止。

### 2.3 混合权重

本文通过定义目标函数构造一个非线性规划，从而将混合权重的计算转化为一个最优解计算问题。假设有 $k$ 种评价方法，$m$ 个评价指标，第 $j$ 种方法得到的指标权重为 $\boldsymbol{w}^{(j)}$，综合 $k$ 种方法得到的混合权重为 $\boldsymbol{w}$，以混合权重与各方法所得权重的距离偏差最小为目标函数，距离计算采用 $m$ 维空间的欧氏距离。权重计算模型为

$$f(w_i)=\sum_{j=1}^{k}\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(w_i-w_i^{(j)})^2}$$

$$\text{s.t.}\ \begin{cases}\min_{1\le j\le k}\{w_i^{(j)}\}\le w_i\le \max_{1\le j\le k}\{w_i^{(j)}\}\\ \sum_{i=1}^{m}w_i=1\end{cases} \tag{8}$$

该模型以最小距离和为目标函数，通过求解各评价指标之间权重的最小偏差，综合利用 $k$ 种方法得到混合权重 $\boldsymbol{w}$，进而得到被评价对象的评分值，比较被评价对象的优劣。

## 3 评分标准与分区标准

为使配电网评价能够体现不同区域配电网差异化的特点，各评价指标参考值的确定综合考虑了现有技术标准、规划成果以及统计数据等资料[18-20]。根据供电分区结果各指标按照 B、C、D 三类划分，确定各类分区的参考标准。以供电可靠性指标为例，如表 6 所示(“—”表示被删去的指标)。

**表 6 二级指标差异化评分表**

Table 6 Secondary indices differentiation score table

| 一级指标 | 二级指标 | 参考标准类别 | | |
|---|---|---|---|---|
| | | B 类 | C 类 | D 类 |
| 供电可靠性 | 主变 $N$-1 通过率/% | 80 | 70 | 50 |
| | 线路 $N$-1 通过率/% | 80 | 70 | 50 |
| | 变电站非经济区间负载率/% | — | — | 30 |
| | 线路非经济区间负载率/% | 15 | 20 | 30 |
| | 非典型接线比例/% | 10 | 20 | 30 |
| | 单辐射接线比例/% | 10 | 20 | — |
| | 中压配电网平均分段数 | 4 | 3 | 2 |
| | 10 kV 架空网联络率/% | 80 | 70 | 60 |

评价指标分值的计算方法很多，目前应用较为广泛的是模糊隶属度法。应用线性插值原理，配电网评价指标体系采用如下简化方法构建各类指标的隶属函数：对正向指标高于指标参考值上限的，得满分；否则，每低于参考值一定数值扣除相应分数。对逆向指标低于指标参考值下限的，得满分；否则，每高于参考值一定数值扣除相应分数。

本文指标的得分区间取为 $[a,b]$($a$、$b$ 为任意整数)，正向指标得分的隶属度函数为

$$f_p(x)=a+(b-a)\cdot\frac{x_p-x_{p\min}}{x_{p\max}-x_{p\min}},\quad x_p\in[x_{p\min},x_{p\max}] \tag{9}$$

式(9)中，$x_{p\min}$、$x_{p\max}$ 分别为正向指标的最小值和最大值。

逆向指标得分的隶属度函数为

$$f_q(x)=a+(b-a)\cdot\frac{x_{q\max}-x_q}{x_{q\max}-x_{q\min}},\quad x_q\in[x_{q\min},x_{q\max}] \tag{10}$$

式(10)中，$x_{q\min}$、$x_{q\max}$ 分别为逆向指标的最小值和最大值。

由于单项指标评分无法全面反映配电网规划的整体状况，因此需要计算配电网规划的综合得分

$F$ 为

$$F=\sum_{i=1}^{m} f_i(x)\cdot w_i \tag{11}$$

式(11)中：$f_i(x)$ 是第 $i$ 个指标的单项得分，或为 $f_p(x)$ 或为 $f_q(x)$；$w_i$ 为其权重。

本文所提出的基于供电分区的配电网综合评价指标体系与方法的分析计算流程如图 1 所示。

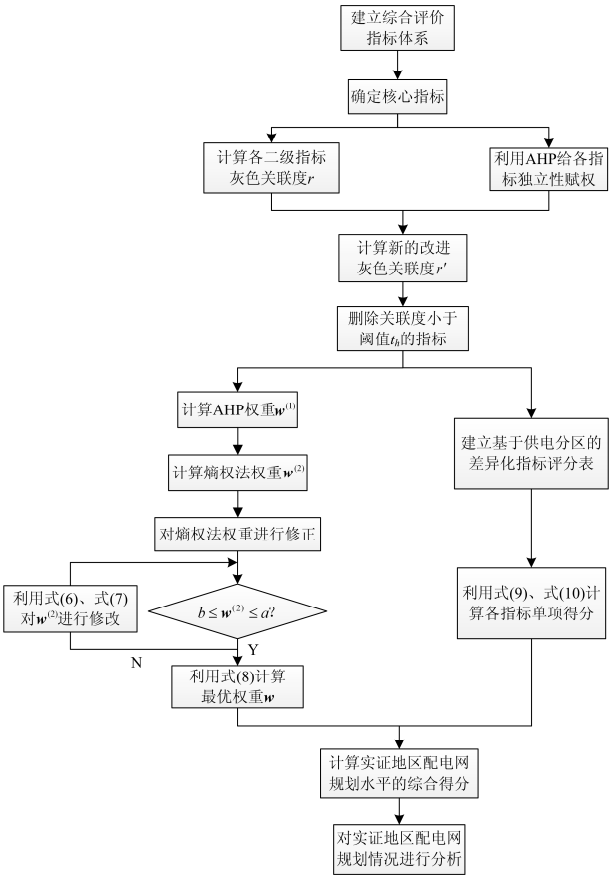



**图 1 分析计算流程图**

Fig. 1 Analysis and calculation flowchart

## 4 实例分析

应用本文提出的方法对河南省某市 2015—2016 年的配电网规划情况进行分析。按照该市各分区负荷所占比重，结合专家意见，得到 B、C、D 三类供电区的权重系数分别为 0.4、0.35、0.25。

### 4.1 指标优化

利用 1.2 节中提出的改进灰色关联度，将构建的指标体系应用于河南省某市的配电网规划，通过指标优化建立该市的配电网综合评价指标体系。

### 4.2 权重计算

应用本文中提出的权重计算方法得到各一级指标的混合权重如表 7 所示。

**表 7 一级指标的权重**

Table 7 Weight of first grade indices

| 一级指标 | 供电可靠性 | 供电质量 | 规划协调性 | 规划效用性 | 抗灾变能力 | 智能化发展水平 | 项目环境和社会效益 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 层次分析法 | 0.203 | 0.176 | 0.17 | 0.15 | 0.13 | 0.11 | 0.06 |
| 熵权法 | 0.244 | 0.218 | 0.161 | 0.126 | 0.104 | 0.067 | 0.08 |
| 改进熵权法 | 0.203 | 0.203 | 0.178 | 0.139 | 0.115 | 0.074 | 0.088 |
| 混合结果 | 0.203 | 0.190 | 0.174 | 0.145 | 0.122 | 0.092 | 0.074 |

### 4.3 指标评分

应用本文表 6 的差异化评价体系和式(9)—式(11)($a$,$b$ 取值为 0 和 100)的评分公式计算河南省某市配电网规划在 2015 年和 2016 年期间的得分情况如表 8 和表 9 所示。

**表 8 2015 年河南省某市配电网规划综合评分表**

Table 8 Comprehensive score table of distribution network planning in a city of Henan in 2015

| | B 类 | C 类 | D 类 | 总分 |
|---|---|---|---|---|
| 供电可靠性 | 93.12 | 85.16 | 81.24 | 87.36 |
| 供电质量 | 91.65 | 85.31 | 80.24 | 86.57 |
| 规划效用性 | 88.07 | 82.87 | 83.68 | 85.15 |
| 规划协调性 | 86.12 | 84.95 | 80.25 | 84.24 |
| 抗灾变能力 | 90.06 | 87.43 | 85.64 | 88.03 |
| 智能化发展水平 | 82.26 | 73.98 | 71.29 | 76.61 |
| 环境和社会效益 | 90.86 | 86.17 | 83.02 | 87.25 |
| 总分 | 90.829 | 87.074 | 83.508 | 87.68 |

**表 9 2016 年河南省某市配电网规划综合评分表**

Table 9 Comprehensive score table of distribution network planning in a city of Henan in 2016

| | B 类 | C 类 | D 类 | 总分 |
|---|---|---|---|---|
| 供电可靠性 | 97.13 | 94.27 | 87.95 | 89.43 |
| 供电质量 | 96.93 | 89.61 | 85.46 | 89.89 |
| 规划效用性 | 95.07 | 91.34 | 89.62 | 85.67 |
| 规划协调性 | 89.12 | 85.95 | 83.25 | 85.91 |
| 抗灾变能力 | 93.61 | 90.71 | 83.18 | 89.98 |
| 智能化发展水平 | 86.69 | 82.56 | 80.29 | 85.54 |
| 环境和社会效益 | 93.65 | 90.83 | 88.16 | 91.29 |
| 总分 | 93.925 | 89.902 | 86.424 | 90.64 |

### 4.4 综合评价

根据表 8 和表 9 可知，该市配电网的整体水平在 2015—2016 年有所提高，然而规划效用性和智能化发展水平是该市配电网规划的主要不足。此外，通过对比各子项得分数据，分析三类区域的得分对

总分的贡献率可以发现，C 类和 D 类供区比 B 类供区贡献率的提升效果更为明显，但 C 类和 D 类供区的电网整体发展水平仍然有待提高，其中得分不足 80 的二级指标如表 10 所示。

**表 10 得分不足 80 的二级指标**

Table 10 Secondary indices with score less than 80

| 指标 | 得分 |
|---|---|
| 110 kV *N*-1 通过率 | 74.9 |
| C、D 类 10 kV 线路非经济负载 | 76.4 |
| 10 kV 架空网联络率 | 73.3 |
| C、D 类中压配电网平均分段数 | 69.2 |
| D 类 10 kV 供电半径超限 | 78.7 |
| 10 kV 负荷不平衡 | 70.6 |
| D 类 10 kV 线路截面 | 74.5 |
| 单位投资增供电量 | 79.6 |
| D 类设备水平优化敏感 | 64.1 |
| 10 kV 负荷预测偏差 | 67.3 |
| 10 kV 变电站规划落地 | 75.8 |
| 配电自动化率 | 65.2 |

根据表 10 中的数据不难发现，上述指标反映出该市低压配电网网架结构整体依然较为薄弱，D 类供区供电质量的问题仍然没有根本解决。规划效用性中单位投资增供电量和 D 类设备水平优化敏感得分较低，这反映该市配电网投资依然较为粗放，需要继续加强公司投资全过程管理，确保精准投资，保障配电网投资效益。

表 10 表明，虽然配电网整体水平有所提升，但是配电网规划的主要不足并没有显著改善，资金配置不够合理的问题依然存在，有必要根据指标得分结果对后续规划方案进行修正。表 10 中的数据说明，需要解决的问题为：1) 增加改善 10 kV 配电网网架结构的资金投入。2) 针对 D 类供区低压供电半径长、低压线路截面小、低压三相不平衡等对低压电网做进一步改造，加大对 D 类供区配网设备的改造。在资金不足的情况下减少 B 类和 C 类供区在供电可靠性和供电质量上的资金投入。3) 加大配网的信息化和自动化建设，特别是城市中心区域。

## 5 结论

本文建立了一套基于供电分区的配电网规划的综合评价指标体系，并且在指标优化、指标评分和综合评价方法方面都充分考虑了不同分区的差异性。在指标优化方面，本文在传统灰色关联度的基础上提出了通过核心指标来简化灰色关联度的计算过程，同时考虑到单独使用灰色关联理论会不利于指标间的相互独立性，因此在指标筛选过程中将层次分析法与灰色关联分析法相结合，实现了指标优化与去冗余的双重目的。在指标权重方面，利用层次分析法对熵权法权重计算方法进行了改进，使其权重更加合理。此外，本文以最小距离和为目标函数，提出了一种最优权重计算模型，对单一赋权方法进行了改进。实例证明，本文建立的评价指标体系与综合评价模型，能够全面衡量配电网规划质量，对比规划前后电网的改善情况，对配电网的后续规划与建设具有指导意义。

## 参考文献


[1] LI Weixing, WANG Peng, LI Zhimin, et al. Reliability evaluation of complex radial distribution systems considering restoration sequence and network constrains[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 753-758.

[2] 潘翀, 袁霞, 唐伦. 大型城市高压配电网可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 131-138.
PAN Chong, YUAN Xia, TANG Lun. Reliability analysis for high voltage distribution network in big cities[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 131-138.

[3] 王成山, 王赛一, 葛少云, 等. 中压配电网不同接线模式经济性和可靠性分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 34-39.
WANG Chengshan, WANG Saiyi, GE Shaoyun, et al. Economy and reliability analysis of different connection modes in MV distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 34-39.

[4] 刘伟, 郭志忠. 配电网安全性指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 85-90.
LIU Wei, GUO Zhizhong. Research on security indices of distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 85-90.

[5] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-52, 71.
XIONG Yiwang, CHENG Haozhong, WANG Haiqun, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 48-52, 71.

[6] 丁立, 贾秀芳, 赵成勇, 等. 基于可拓学的电能质量综合评价[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 44-47.
DING Li, JIA Xiufang, ZHAO Chengyong, et al. Synthetic evaluation of power quality based on extenics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 44-47.

[7] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.

LIU Shuming, LI Qionglin, CHEN Dongxin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.

[8] 羌丁建, 寿挺, 朱铁铭. 高压配电网规划评价指标体系与综合评价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 52-57.
QIANG Dingjian, SHOU Ting, ZHU Tieming. An evaluation index system and comprehensive evaluation model on high-voltage distribution network planning[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 52-57.

[9] 肖峻, 罗凤章, 王成山, 等. 电网规划综合评判决策系统的设计与应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 9-13.
XIAO Jun, LUO Fengzhang, WANG Chengshan, et al. Design and application of a multi-attribute decision-making system for power system planning[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 9-13.

[10] 肖峻, 王成山, 周敏. 基于区间层次分析法的城市电网规划综合评判决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 50-57.
XIAO Jun, WANG Chengshan, ZHOU Min. An IAHP-based MADM method in urban power system planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 50-57.

[11] 韩震焘, 黄志伟, 葛少云, 等. 城市配电网综合评价体系[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 95-99.
HAN Zhentao, HUANG Zhiwei, GE Shaoyun, et al. A comprehensive evaluation system of urban distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 95-99.

[12] 配电网规划设计技术导则[S]. 北京: 国家电网公司, 2016.

[13] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 63-108.

[14] 杨良军, 熊小伏, 张媛. 基于灰色关联度和理想解法的电力设备状态维修策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 74-78.
YANG Liangjun, XIONG Xiaofu, ZHANG Yuan. Research on condition-based maintenance policy of electric power equipment based on grey correlation degree and TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(18): 74-78.

[15] 周名煜, 谢宁, 王承民. 基于灵敏度和灰色关联度的配电网运行方式变权重评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 130-137.
ZHOU Mingyu, XIE Ning, WANG Chengmin. Variable weight evaluation method of distribution network operation mode based on sensitivity and grey correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 130-137.

[16] 骆正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(9): 51-60.
LUO Zhengqing, YANG Shanlin. Comparative study on several scales in AHP[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2004, 24(9): 51-60.

[17] 马纪, 刘希喆. 基于序关系-熵权法的低压配网台区健康状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 87-93.
MA Ji, LIU Xizhe. Evaluation of health status of low-voltage distribution network based on order relation-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 87-93.

[18] 城市配电网运行水平和供电能力评估导则: Q/GDW 565—2010[S]. 北京: 国家电网公司, 2010.

[19] 国家电网公司“十二五”配电网规划(技术原则)指导意见[R]. 北京: 国家电网公司, 2010.

[20] 河南省电力公司城市中低压配电网技术导则[S]. 郑州: 国家电网公司, 2016.

**收稿日期：2017-10-17；　修回日期：2017-12-04**

**作者简介：**

田春筝(1982—)，男，硕士，高级工程师，研究方向为配电网规划技术；E-mail: tianchunzheng@ha.sgcc.com.cn

殷奕恒(1994—)，男，硕士研究生，研究方向为配电网规划技术；E-mail: 1136869083@qq.com

关朝杰(1987—)，男，硕士，工程师，研究方向为配电网规划技术。E-mail: guanchaojie@ha.sgcc.com.cn

(编辑　魏小丽)