

# 基于改进 $K$ -means 聚类算法的供电块划分方法

韩俊<sup>1</sup>, 谈健<sup>1</sup>, 黄河<sup>2</sup>, 乔黎伟<sup>1</sup>

(1. 国网江苏省电力公司经济技术研究院 规划评审中心, 江苏 南京 210008;

2. 国网江苏省电力公司 发展策划部, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 在已知供电区域内现状或远景规划的变电站的位置、座数和容量数据的基础上, 应用改进的  $K$ -means 聚类算法, 结合变电站等效圆形供电模型将供电块划分问题由平面点划分转化为面积域的划分问题, 同时定义相应指标作为评价的标准, 将变电站划分至最合适的供电分块中, 形成一系列由小规模数量的变电站组成的供电块集合。某实际算例验证了所提方法的合理性。

**关键词:** 配电; 变电站; 聚类算法; 供电模型; 供电块划分

**中图分类号:** TM 715

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.019

## 0 引言

对于供电范围较大的供电区域, 110 kV (35 kV) 变电站数量庞大、布点散乱, 如果直接进行该区域的网架结构优化研究工作, 那么其工作量将会非常大, 方向性比较难把握, 任务艰巨, 且不一定收到很好的成效。

传统规划常以行政区域为边界来划分供电区域, 没有考虑电网的实际情况。本文将影响供电区域划分的多种因素考虑在内, 将各种因素的影响量化, 探索数学约束条件, 以求寻找一种综合考虑电网实际情况的供电区块划分方法。

为了进一步提高配电网优化规划<sup>[1-12]</sup>的效率及精细化程度, 避免对不存在联络关系的变电站进行无谓的搜索计算, 本文以聚类分析思想为基础, 提出了基于改进  $K$ -means 聚类算法的供电块划分方法, 将大范围的供电区域合理地切割成若干小规模供电块, 分别针对各个供电块开展网络结构的优化规划研究, 这样层次清晰、工作重点明确, 且规划效果明显。

## 1 基于改进的 $K$ -means 聚类分析算法

### 1.1 聚类分析的概念

所谓聚类就是按照事物的某些属性, 把事物聚集成类, 使类间的相似性尽可能小, 类内相似性尽可能大。聚类是一个无监督的学习过程, 它同分类的根本区别在于: 分类是需要事先知道所依据的数据特征, 而聚类是要找到这个数据特征。因此, 在很多应用中, 聚类分析作为一种数据预处理过程, 是进一步分析和处理数据的基础<sup>[13]</sup>。

一个能产生高质量聚类的算法必须满足下面 2 个条件<sup>[14]</sup>: 类内数据或对象的相似性最强; 类间数据

或对象的相似性最弱。

### 1.2 $K$ -means 聚类算法的基本原理

$K$ -means 聚类算法是一种硬聚类算法, 是典型的基于原型的目标函数聚类方法的代表, 它以数据点到原型(类别中心)的某种距离之和作为优化的目标函数, 利用函数求极值的方法来得到迭代运算的调整规则<sup>[15-16]</sup>。

### 1.3 $K$ -means 聚类算法的优点和不足

a. 与层次聚类相比,  $K$ -means 聚类算法可以得到更紧密的簇, 尤其是对球状簇;

b. 对大数据集,  $K$ -means 聚类算法是可伸缩和高效率的;

c.  $K$ -means 聚类算法尝试找出使平方误差函数值最小的  $k$  个划分, 当结果簇是密集的, 而且簇和簇之间区别明显时, 效果较好;

d.  $K$ -means 聚类算法需要用户预先指定聚类的个数, 但在大多数实际应用中, 最终的聚类个数是未知的, 这在一定程度上限制了该聚类算法的应用;

e. 对于  $k$  个初始中心点的选取是随机完成的, 而初始中心点选取的不同会导致不同的聚类结果, 这种随机选取初始聚类中心的方法将会引起聚类结果的不稳定性。

### 1.4 $K$ -means 聚类算法的改进策略

本文针对传统  $K$ -means 聚类算法的不足, 从初始中心点的选取和划分数  $k$  的确定这两方面提出相应的改进措施。

#### 1.4.1 选取初始中心点的方法

本文针对  $K$ -means 聚类算法的不足, 提出了改进的初始中心点的选取方法, 通过样本间平均距离<sup>[17]</sup>的引入, 能够很好地体现数据的分布情况, 使得初始中心点尽可能地趋向于比较密集的范围, 从而进行更好的聚类。

假设待聚类对象  $X = \{x_i | x_i \in \mathbf{R}^p, i = 1, 2, \dots, n\}$ ,  $k$

个聚类中心用  $Z_1, Z_2, \dots, Z_k$  表示, 有如下定义。

定义 1 2 个  $P$  维向量  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iP})^T$  和  $\mathbf{x}_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jP})^T$  间的距离用欧氏距离表示:

$$d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \sqrt{\sum_{t=1}^P (x_{it} - x_{jt})^2} \quad (1)$$

定义 2 样本点间的平均距离  $d_{\text{mean}}$  为:

$$d_{\text{mean}} = \frac{\sum d(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)}{C_n^2} \quad (2)$$

其中,  $C_n^2$  表示从  $n$  个不同元素中取出 2 个元素的所有组合的个数。

#### 1.4.2 最佳聚类划分数 $k$ 的选取方法

$K$ -means 聚类算法在供电块划分方面的应用是以确定的供电块划分数  $k$  为前提对变电站进行分块划分的。在实际操作中,  $k$  值是难以准确界定的, 本次研究以类间类内划分 BWP (Between-Within Proportion) 指标<sup>[18]</sup>来确定供电块划分的最佳分块数。BWP 指标是一种基于样本几何结构, 以数据集中某个样本为研究对象, 对聚类结果进行有效性分析的指标, 主要计算公式如下:

$$a_{\text{BWP}}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \text{BWP}(j, i) \quad (3)$$

$$k_{\text{opt}} = \underset{k_{\min} \leq k \leq k_{\max}}{\operatorname{argmax}} [a_{\text{BWP}}(k)] \quad (4)$$

其中,  $n_i$  为第  $i$  个供电分块中的变电站数;  $a_{\text{BWP}}(k)$  为供电块划分为  $k$  个时 BWP 指标的平均值;  $\operatorname{argmax}[\cdot]$  为一函数, 其返回  $a_{\text{BWP}}(k)$  取最大值时的  $k$  值。

该指标反映了单个样本的聚类有效性情况, 指标值越大, 说明单个样本的聚类效果越好。通过计算数据集中所有样本的 BWP 指标的平均值来分析该数据集的聚类效果, 平均值越大, 说明该数据集的聚类效果越好。

## 2 基于改进 $K$ -means 聚类算法的供电块划分方法

### 2.1 供电块划分与点的聚类划分间差异性分析

#### 2.1.1 变电站圆形等效供电半径的折算

为了综合考虑变电站配置和负荷密度等多种因素, 在供电块划分过程中就必须考虑变电站的供电范围, 供电块划分问题也因此由平面点划分的问题转化为面积域划分的问题。本次研究为了便于供电块的划分, 把变电站的供电范围近似等效为圆。

a. 供电范围内负荷密度均匀的情况。

当变电站圆形等效供电范围内负荷密度均匀时, 可按照目前计算变电站圆形供电半径的方法。从规划区域的角度出发, 根据变电站圆形供电范围内负荷密度的大小和供电圆的面积, 折算出的等效供电半径可按式计算:

$$r = \sqrt{\frac{Q_{\text{supply}}}{\pi M}} = \sqrt{\frac{NRT \cos \theta}{\pi M}} \quad (5)$$

其中,  $R$  为变电站单台主变容量;  $N$  为主变台数;  $T$  为满足主变  $N-1$  条件下的最大负载率;  $\cos \theta$  为功率因数;  $M$  为变电站圆形供电范围内的负荷密度;  $r$  为变电站圆形供电范围的半径。

b. 供电范围内负荷密度不均匀的情况。

变电站圆形等效供电范围包含不同负荷密度区域时的示意图如图 1 所示。

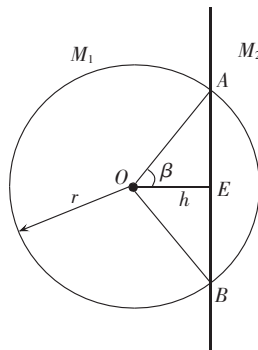


图 1 基于不同负荷密度的变电站等效供电范围

Fig.1 Equivalent power-supplying range of substation based on different load densities

以负荷等价纽带, 经分析有下式成立:

$$\begin{cases} \cos \beta = \frac{h}{r} \\ S_2 = \beta r^2 - \frac{1}{2} r^2 \sin 2\beta \\ S_1 = \pi r^2 - S_2 \\ M_1 S_1 + M_2 S_2 = Q_{\text{supply}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $S_1, S_2$  分别为负荷密度  $M_1, M_2$  下部分等效供电圆的面积。经过数学分析, 式(6)不一定存在满足要求的解, 故在求解变电站圆形等效供电范围的半径时不能按照上式获得精确解。

在变电站圆形等效供电范围内各种负荷密度的分块所占面积求解的基础上, 得出变电站等效圆形供电范围半径近似解的表达式如下:

$$\begin{aligned} r &= r' \\ \text{s.t. } \left| Q_{\text{supply}} - \sum_{i=1}^m M_i S_i(r') \right| &\leq \delta \end{aligned} \quad (7)$$

其中,  $m$  为变电站等效圆形供电范围内包含负荷密度的类数;  $S_i(r')$  为第  $i$  类负荷密度的分块在变电站等效圆形供电范围内的面积, 其为  $r'$  的函数;  $\delta$  为灵敏系数, 表示误差的范围。

#### 2.1.2 变电站界间距概念的定义及计算

a. 问题的提出。

供电块划分的目的是为了便于各供电块内变电站之间联络结构的优化规划, 而变电站之间是否互联与变电站之间的地理距离和变电站各自的供电范

围都有紧密的联系。同时,变电站圆形等效供电范围的确定就为变电站间互联与否的判断提供了参考依据。

从图 2 可以看出,左图中变电站  $\text{sub}_1$  和变电站  $\text{sub}_2$  间的地理距离  $d_{1,2}$  小于右图中变电站  $\text{sub}_3$  和变电站  $\text{sub}_4$  间的距离  $d_{3,4}$ 。假设变电站的供电范围为圆形,在左图中,由于变电站附近负荷密度过大,供电半径很小,这 2 座变电站的供电范围没有交集,因此 2 座站互联的可能性较小;相反在右图中,由于变电站附近负荷密度很小,供电半径较大,2 座变电站的供电范围出现了重合的部分,因而变电站之间建立联络的可能性较大。因此本文在进行供电块划分时,不能简单地考虑变电站间的欧氏(地理)距离,故在此基础上引入了变电站界间距的概念。

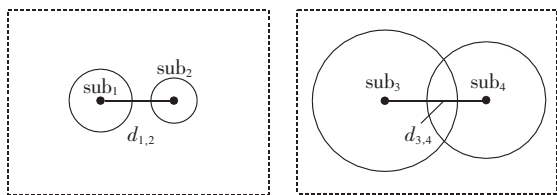


图 2 不同地理距离下 2 座变电站间的联络示意图

Fig.2 Schematic diagram of connection between substations for different geographic distances

#### b. 变电站界间距的概念及计算方法。

变电站界间距是指在假定 2 座变电站供电范围为圆形的前提下,其圆形供电范围的近侧圆弧之间相离程度的大小。设平面上 2 座变电站的编号为  $i$ 、 $j$ ,其坐标分别为  $(x_{i0}, y_{i0})$  和  $(x_{j0}, y_{j0})$ ,等效圆形供电半径分别为  $r_i$  和  $r_j$ ,则两者之间的欧氏(地理)距离  $d(i, j)$  和界间距  $D(i, j)$  间的关系如下所示:

$$D(i, j) = d(i, j) - r_i - r_j = \sqrt{(x_{i0} - x_{j0})^2 + (y_{i0} - y_{j0})^2} - r_i - r_j \quad (8)$$

由上式可知,  $D(i, j)$  的取值有 3 种类型:  $D(i, j) > 0$ ;  $D(i, j) = 0$ ;  $D(i, j) < 0$ 。不同取值情况下的变电站界间距示意图如图 3 所示。

$D(i, j) > 0$  表示 2 座变电站的圆形供电范围没有交集,说明 2 座变电站不存在共同带负荷的情况,  $D(i, j)$  越大, 2 座变电站建立联络的可能性越小;  $D(i, j) \leq 0$  表示 2 座变电站的圆形供电范围有交集,说明 2 座变电站可能存在共同带负荷的情况,  $D(i, j)$  越小, 变电站间建立联络的可能性越大。

## 2.2 改进 K-means 聚类算法在供电分块中的应用

### 2.2.1 供电块初始聚类中心的形成

在已知供电块划分块数  $k$  的基础上,首先生成一组供电分块初始聚类中心的位置集合。每座变电站都可以用二维平面上的一个点表示,每一个点存在  $(x, y)$  坐标。结合变电站的实际地理位置,以变电站界间距的计算结果为依据,筛选出最可能存在于同

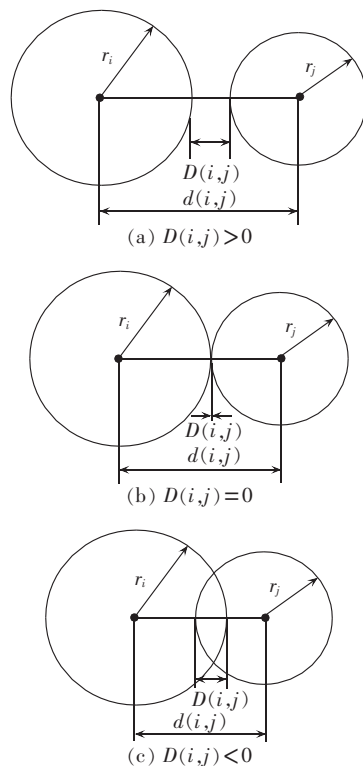


图 3 不同取值情况下的变电站界间距示意图

Fig.3 Schematic diagram of distances between substation boundaries for different values

一分块内的变电站,以其界间距的中心点作为分块聚类中心的初始位置,迭代过程中利用每次迭代各供电分块中变电站的不同,在初始位置的基础上搜索,找到最终合理的位置值。供电分块初始聚类中心形成的具体步骤如下。

a. 将供电区域内的变电站编号为  $1, 2, \dots, n$ , 按式(8)计算任意 2 座变电站间的界间距,记为  $D(i, j)$ , 并计算所有界间距的平均值,如下所示:

$$l_{\text{mean}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n D(i, j)}{A_n^2} \quad i \neq j \quad (9)$$

其中,  $A_n^2$  表示从  $n$  个不同变电站中取出 2 座变电站的所有可能的排列组合数目。

b. 对所有界间距按照由小到大的顺序进行排序,存入向量  $\mathbf{D}$  中,将最小的界间距对应的中心点作为第一个初始聚类中心,其坐标  $z_1$  计算方法如式(10)所示:

$$z_1 = \text{center}(x_{i,j}, y_{i,j}) \quad (10)$$

其中,  $\text{center}(x_{i,j}, y_{i,j})$  为变电站  $i$  和变电站  $j$  的界间距的中心点坐标。

c. 计算出变电站次小界间距所对应的中心点坐标,同时算出它与先前已确定的初始聚类中心的距离并与界间距的平均值  $l_{\text{mean}}$  进行比较,若它与先前已有初始聚类中心的距离均大于等于  $l_{\text{mean}}$ ,则将该界间距对应的中心点作为下一个初始聚类中心;否则,重复



步骤 c。

d. 当初始聚类中心的个数没有达到  $k$ , 而所有界间距却又全部经过判断时, 则动态缩小界间距的平均值, 并清空步骤 c 中查找到的初始聚类中心, 重复步骤 c。

e. 当初始聚类中心的个数达到  $k$  时, 则认为初始聚类中心完全形成, 待迭代结束后求得最终的聚类结果。

### 2.2.2 最佳供电块划分数 $k$ 的确定

设  $K = \{X, R\}$  为供电块划分的聚类空间, 其中  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  为变电站样本集合, 假设  $n$  座变电站样本被划分为  $k$  个分块, 则有相似定义如下。

定义 1 定义第  $i$  个供电分块中的第  $j$  座变电站的最小块间界间距  $b(i, j)$  为该变电站到其他每个供电分块中变电站平均界间距的最小值, 根据供电块划分的实际情况, 应该有  $b(i, j) > 0$  成立, 如下式所示:

$$b(i, j) = \min_{1 \leq l \leq c, l \neq i} \left( \frac{1}{n_l} \sum_{p=1}^{n_l} D(x_p^{(l)}, x_j^{(i)}) \right) \quad (11)$$

其中,  $c$  表示供电块被分为  $c$  类;  $n_l$  为第  $l$  类供电块中变电站数;  $x_p^{(l)}$  为第  $l$  类的第  $p$  个样本;  $x_j^{(i)}$  为第  $i$  类的第  $j$  个样本。

定义 2 定义第  $i$  个供电分块中的第  $j$  座变电站的块内界间距  $w(i, j)$  为该变电站到第  $i$  个分块中其他所有变电站界间距折算值的平均值, 如下式所示:

$$w(i, j) = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{q=1, q \neq j}^{n_i} D'(x_q^{(i)}, x_j^{(i)}) \quad (12)$$

特别指出的是, 根据变电站界间距的定义和计算方法, 供电块内的变电站界间距计算值有正有负。为了提高供电块划分的有效性, 在计算块内界间距  $w(i, j)$  时需要把变电站界间距折算成非负值。

如图 4 所示, 左图中变电站间界间距小于 0, 右图中变电站间界间距大于 0, 且两者绝对值相等。显

然, 左图中 2 座变电站的块内紧密性要强于右图, 因此左图中变电站间界间距的折算值应要小于右图中变电站间的界间距, 因此, 引入折算因子  $\varepsilon$ 。

$$D'(x_q^{(i)}, x_j^{(i)}) = \varepsilon |D(x_q^{(i)}, x_j^{(i)})|$$

$$\varepsilon = \begin{cases} 1 & D(x_q^{(i)}, x_j^{(i)}) \geq 0 \\ \frac{r_q^{(i)} + r_j^{(i)} - |D(x_q^{(i)}, x_j^{(i)})|}{r_q^{(i)} + r_j^{(i)} + |D(x_q^{(i)}, x_j^{(i)})|} & D(x_q^{(i)}, x_j^{(i)}) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

定义 3 定义第  $i$  个供电分块中的第  $j$  座变电站的聚类界间距  $a_{bw}(i, j)$  为该变电站最小块间界间距  $b(i, j)$  与块内界间距  $w(i, j)$  之和。

定义 4 定义第  $i$  个供电分块中的第  $j$  座变电站的聚类离差界间距  $s_{bw}(i, j)$  为该变电站最小块间界间距  $b(i, j)$  与块内界间距  $w(i, j)$  之差。

定义 5 定义第  $i$  个供电分块中的第  $j$  座变电站的类间类内划分指标  $BWP(i, j)$  为该变电站的聚类离差界间距和聚类界间距的比值, 如下式所示:

$$BWP(i, j) = \frac{s_{bw}(i, j)}{a_{bw}(i, j)} \quad (14)$$

BWP 指标是从变电站界间距测度考虑, 就是使供电分块内变电站间界间距极小化而供电分块间界间距最大化的划分是最优划分。但是这样可能会导致选取的划分方案中某些供电分块内变电站数量过多, 而某些供电分块内出现孤立变电站的情况。因此, 为了解决这一问题, 本文定义了供电块划分均衡性指标, 对  $a_{BWP}(k)$  值较大的几种划分方案计算其均衡性水平, 然后综合考虑 2 种指标水平确定供电块最佳划分数  $k$ 。供电块均衡性指标  $\beta(k)$  的计算方法如式(15)所示:

$$\beta(k) = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left( n_i - \frac{n}{k} \right)^2} \quad (15)$$

需要指出的是, 该指标为负型指标, 即指标取值越小, 供电块的均衡性水平越高, 在此基础上确定供电块划分的最佳分块数。

### 2.2.3 供电块划分的整体流程

基于改进 K-means 聚类算法的供电块划分详细流程如图 5 所示, 图中  $\eta$  为界间距平均值  $l_{mean}$  的动态调整系数。

需要特别指出的是, 当聚类集合中只有 1 座变电站时, 其聚类中心在迭代过程中保持不变。

## 3 实际算例分析

某地区远景期规划建设 110 kV(35 kV) 变电站 28 座, 其中变电站布点规划结果及负荷密度分布情况如图 6 所示。

选取该地区左下角为原点建立坐标轴, 则可以得到所有变电站的相对位置坐标, 以远景期规划变电站的配置规模和区块负荷密度为基础数据, 折算每座变

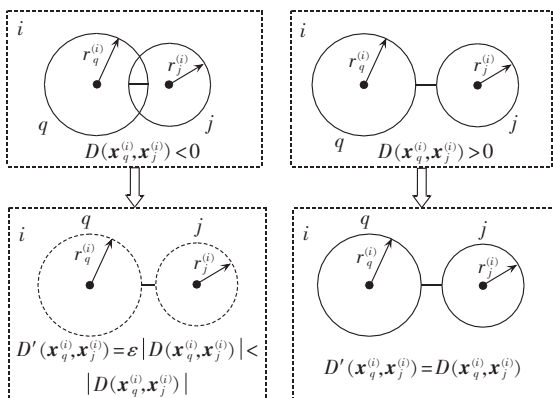


图 4 变电站界间距折算示意图

Fig.4 Schematic diagram of distance conversion between substation boundaries

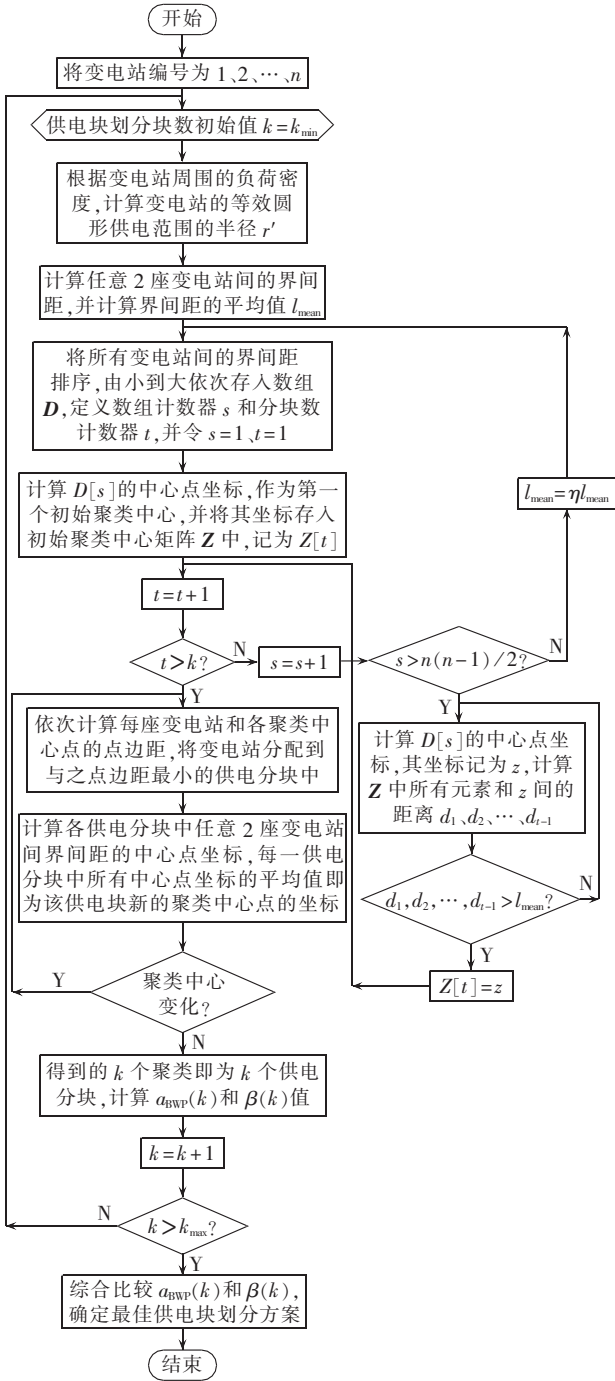


图 5 基于改进 K-means 聚类算法的供电块划分流程

Fig.5 Flowchart of power-supplying block partition based on improved K-means clustering algorithm

电站的圆形等效供电半径。然后根据本文提出的基于改进的 K-means 聚类算法进行供电块的划分,供电块划分数  $k$  的取值范围为 2~10,不同划分方案情况下平均 BWP 指标和均衡性指标  $\beta$  的计算结果如表 1 所示。

结合表 1 中不同供电块划分方案下的平均 BWP 值和供电块划分均衡性水平指标  $\beta$  的对比分析,划分分数为 9 时的平均 BWP 值远远高于其他划分方案,因此,该供电区域划分方案选取划分分数为 9 时的方案

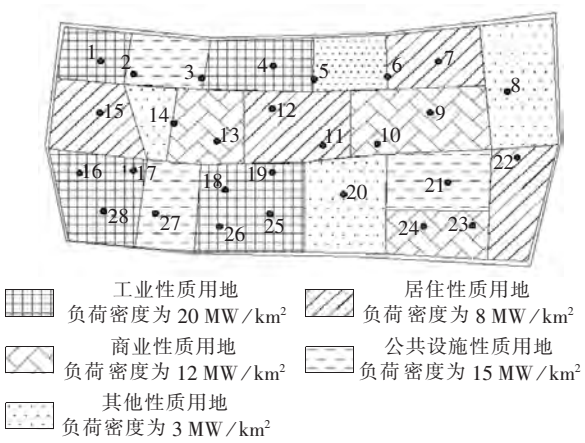


图 6 某地区远景期变电站规划布点及负荷密度分布图  
Fig.6 Planned substation allocation and load density distribution for a region

表 1 不同划分方案情况下平均 BWP 指标和均衡性指标  $\beta$  的计算结果

Table 1 Calculative average BWP index and equilibrium index  $\beta$  for different partition schemes

| 供电块划分分数 $k$ | 含 28 座变电站的供电块划分集合                                                                                                         | $a_{BWP}(k)$ | $\beta$ |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---------|
| 2           | {1, 2, 3, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 26, 27, 28}, {4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25}                 | 0.3904       | 2.00    |
| 3           | {1, 2, 3, 14, 15, 16, 17, 27, 28}, {4, 5, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 25, 26}, {6, 7, 8, 9, 10, 21, 22, 23, 24}               | 0.3426       | 0.47    |
| 4           | {1, 2, 3, 14, 15, 16, 17, 27, 28}, {5, 6, 7, 8, 9, 10}, {21, 22, 23, 24}, {4, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 25, 26}             | 0.3308       | 2.12    |
| 5           | {1, 2, 3, 14, 15}, {16, 17, 27, 28}, {5, 6, 7, 8, 9, 10}, {21, 22, 23, 24}, {4, 11, 12, 13, 18, 19, 20, 25, 26}           | 0.3634       | 1.85    |
| 6           | {1, 2, 14, 15}, {16, 17, 27, 28}, {3, 4, 5, 12}, {11, 13, 18, 19, 20, 25, 26}, {6, 7, 8, 9, 10}, {21, 22, 23, 24}         | 0.4093       | 1.10    |
| 7           | {1, 2, 14, 15}, {16, 17, 27, 28}, {3, 4, 5, 12}, {21, 23, 24}, {11, 13, 18, 19, 20, 25, 26}, {8, 22}, {6, 7, 9, 10}       | 0.4334       | 1.41    |
| 8           | {1, 2, 15}, {3, 13, 14}, {16, 17, 27, 28}, {4, 5, 12}, {11, 18, 19, 20, 25, 26}, {8, 22}, {6, 7, 9, 10}, {21, 23, 24}     | 0.5010       | 1.12    |
| 9           | {1, 2, 15}, {3, 13, 14}, {16, 17, 27, 28}, {10, 11, 20}, {4, 5, 12}, {18, 19, 25, 26}, {8, 22}, {6, 7, 9}, {21, 23, 24}   | 0.5771       | 0.57    |
| 10          | {1, 2, 15}, {3, 13, 14}, {18, 26, 27}, {16, 17, 28}, {10, 11, 20}, {4, 5, 12}, {19, 25}, {8, 22}, {6, 7, 9}, {21, 23, 24} | 0.5269       | 0.40    |

为最佳供电块划分方案,供电块最终划分方案如图 7 所示。

通过采用改进的 K-means 聚类算法将含 28 座变电站的供电区域合理地划分为若干小规模供电块,供电块内的变电站间具有非常紧密的联系,同时供电块间变电站之间的联络相对较为薄弱。鉴于此特性,重点对各个供电块开展配电系统的网络结构优化规划将会以最有效、最便捷的路径达到满足整个地区配电系统的精益化规划的需求。

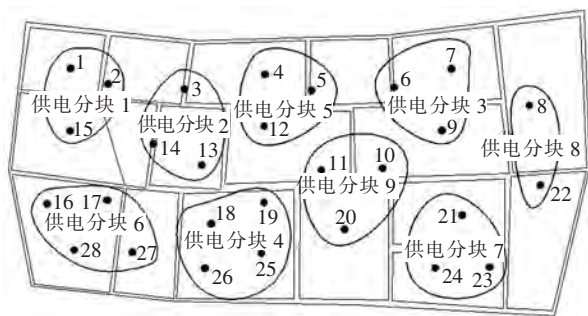


图 7 某地区远景期供电块最佳划分方案示意图

Fig.7 Schematic diagram of optimal power-supplying block partition scheme planned for a region

## 4 结论

为了进一步提高配电系统网络结构优化规划的效率及精细化程度,本文以聚类分析思想为基础,提出了基于改进  $K$ -means 聚类算法的供电块划分方法,主要工作如下:

a. 从初始聚类中心的选取和最佳聚类划分数的确定这 2 个方面对传统的  $K$ -means 聚类算法进行改进;

b. 在透彻分析供电块划分与平面点的划分间差异性的基础上,以变电站圆形供电模型为基础,提出了不同负荷密度下等效半径的折算方法,同时定义了变电站界间距等概念,将供电块的划分问题由平面点的划分转化为面积域的划分;

c. 将改进的  $K$ -means 聚类算法应用到变电站供电块的划分中,建立了基于改进  $K$ -means 聚类算法的供电块划分的详细流程,最后通过实际算例验证了本文所提方法的科学性和合理性。

## 参考文献:

- [1] 韩俊,刘洪,葛少云,等. 面向供电能力提升的主变压器站间联络结构优化建模[J]. 电力系统自动化,2013,37(7):42-47.  
HAN Jun,LIU Hong,GE Shaoyun,et al. Optimization and modeling of contact structure among main transformer in urban distribution network for improving power supply capability[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(7):42-47.
- [2] 周玲,王兴念,丁晓群,等. 基因/禁忌组合算法在配电网架优化规划中的应用[J]. 电网技术,1999,23(9):35-37.  
ZHOU Ling,WANG Xingnian,DING Xiaqun,et al. Application of genetic algorithm/tabu search combination algorithm in distribution network structure planning[J]. Power System Technology,1999,23(9):35-37.
- [3] 陈章潮. 城市电网规划与改造[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [4] 刘晓飞,彭建春,高效,等. 基于单亲遗传算法的配电网络规划[J]. 电网技术,2002,26(3):52-56.  
LIU Xiaofei,PENG Jianchun,GAO Xiao,et al. Distribution network planning based on partheno-genetic algorithm[J]. Power System Technology,2002,26(3):52-56.
- [5] 刘健,杨文宇,余建明,等. 基于改进最小生成树算法并考虑负荷

- 不确定性的配电网架最优规划[J]. 电网技术,2005,29(16):61-65.
- LIU Jian,YANG Wenyu,YU Jianming,et al. Optimal distribution network planning based on improved minimal cost spanning tree algorithm and considering indeterminacy of power loads[J]. Power System Technology,2005,29(16):61-65.
- [6] 刘军,刘自发,黄伟,等. 基于混合微分演化算法(GDE)的配电网架结构智能规划[J]. 电力系统自动化,2007,31(2):32-35.
- LIU Jun,LIU Zifa,HUANG Wei,et al. An intellectual network planning method based on differential evolution[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(2):32-35.
- [7] WANG Chengshan,LUO Fengzhang,BAI Hui,et al. An evaluation method for power supply capacity of distribution system[C]//The Third International Conference on Deregulation and Reconstruction and Power Technologies(DRPT2008). Nanjing,China:IEEE,2008:1244-1248.
- [8] 葛少云,李慧,刘洪. 基于加权 Voronoi 图的变电站优化规划[J]. 电力系统自动化,2007,31(3):29-34.  
GE Shaoyun,LI Hui,LIU Hong. Substation optimization planning based on weighted voronoi diagram[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(3):29-34.
- [9] 葛少云,韩俊,刘洪,等. 基于供电能力的主变电站间联络结构优化[J]. 电网技术,2012,36(8):129-135.  
GE Shaoyun,HAN Jun,LIU Hong,et al. Inter-station contact structure optimization of main transformer based on power supply capability[J]. Power System Technology,2012,36(8):129-135.
- [10] 葛少云,韩俊,刘洪,等. 计及主变过载及联络容量约束的配电系统供电能力计算方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(25):97-103.  
GE Shaoyun,HAN Jun,LIU Hong,et al. Power supply capability determination considering constraints of transformer overloading and tie-line capacity[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(25):97-103.
- [11] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.  
LI Ran,MA Huizhuo,ZHU Jinyao,et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):6-13.
- [12] 姜小静,苏海峰,梁志瑞. 计及风险成本的配电网变电站规划方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):141-145.  
JIANG Xiaojing,SU Haifeng,LIANG Zhirui. Distribution substation planning considering risk cost[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(6):141-145.
- [13] 包颖. 基于划分的聚类算法研究与应用[D]. 大连:大连理工大学,2008.  
BAO Ying. Research and application of cluster algorithm based on partitioning method[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2008.
- [14] 刘少辉,董明楷. 一种基于向量空间模型的多层次文本分类方法[J]. 中文信息学报,2001,15(3):8-14,26.  
LIU Shaohui,DONG Mingkai. An approach of multi-hierarchy text classification based on vector space model[J]. Journal of Chinese Information,2001,15(3):8-14,26.
- [15] 郭明,丁华福. 基于 SOM 网和  $K$ -means 的聚类算法[J]. 计算机与数字工程,2008,36(9):22-24.  
GUO Ming,DING Huafu. Clustering method based on hybrid of SOM and  $K$ -means[J]. Computer & Digital Engineering,2008,36(9):22-24.
- [16] BRADLEY P S,FAYYAD U M. Refining initial points for  $K$ -

means clustering [C] //Proceeding of the 15th International Conference on Machine Learning. San Francisco,CA,USA: Morgan Kaufmann,1998:91-99.

[17] 周爱武,崔丹丹,潘勇. 一种优化初始聚类中心的 K-means 聚类算法[J]. 微型机与应用,2011,30(13):1-3.

ZHOU Aiwu,CUI Dandan,PAN Yong. An optimization initial clustering center of K-means clustering algorithm[J]. Micro-computer & Its Applications,2011,30(13):1-3.

[18] 周世兵,徐振源,唐旭清. K-means 算法最佳聚类数确定方法[J]. 计算机应用,2010,30(8):1995-1998.

ZHOU Shibing,XU Zhenyuan,TANG Xuqing. An optimization initial clustering center of K-means clustering algorithm [J]. Journal of Computer Applications,2010,30(8):1995-1998.

作者简介:



韩 俊 (1985—),男,江苏扬州人,工程师,博士,主要从事配电网规划及相关理论应用方面的研究工作(E-mail:hjchallenge@126.com);

谈 健 (1974—),男,江苏常州人,高级工程师,硕士,主要从事电力系统综合规划研究工作;

黄 河 (1978—),男,江苏扬州人,高级工程师,硕士,主要从事配电网规划和项目开发工作;

乔黎伟 (1973—),男,江苏泰州人,高级工程师,主要从事电网规划方面的研究工作。

Power-supplying block partition based on improved K-means clustering algorithm

HAN Jun<sup>1</sup>,TAN Jian<sup>1</sup>,HUANG He<sup>2</sup>,QIAO Liwei<sup>1</sup>

(1. Planning and Review Center,State Grid Jiangsu Economic Research Institute,Nanjing 210008,China;  
2. Department of Development Planning,State Grid Jiangsu Electric Power Company,Nanjing 210008,China)

**Abstract:** Based on the position,number and capacity of present or planed substations in a power-supplying region,the improved K-means clustering algorithm combined with the equivalent circular power-supplying model of substation is applied to convert the power-supplying block partition problem from planar point to regional area and the corresponding indexes are defined as the evaluation criteria to allocate each substation to the most suitable power-supplying block,forming a series of power-supplying block set composed of a few substations. A practical case verifies the rationality of the proposed method.

**Key words:** electric power distribution; electric substations; clustering algorithms; power-supplying model; power-supplying block partition

(上接第 98 页 continued from page 98)

Optimal configuration of current-limiting measures for multiple DC infeed system

YANG Dong<sup>1</sup>,ZHOU Qinyong<sup>2</sup>,LIU Yutian<sup>3</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute,Ji'nan 250002,China;  
2. China Electric Power Research Institute,Beijing 100192,China;3. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control of Ministry of Education,Shandong University,Ji'nan 250061,China)

**Abstract:** Since the multiple DC infeeds and limit-exceeding short circuit current are two typical phenomena of the receiving-end power grid in China,a method of optimal current-limiting measure configuration is proposed for the multiple DC infeed system. The impact of current-limiting measure on the multi-infeed short circuit ratio is analyzed according to its definition,based on which,the objective functions are established to reflect the cost and effect of current-limiting measure,the tightness of network structure and the supporting capability of receiving-end system to multiple DC infeed. Combined with the branch selection strategy,the fast and non-dominated sorting generic algorithm with elitist strategy is adopted to search the optimal Pareto solution of current-limiting measure configuration. Simulation for an actual system verifies the effectiveness and speediness of the proposed method.

**Key words:** multiple DC infeed; short circuit currents; receiving-end power grid; multi-infeed short circuit ratio; optimization