

文章编号:1671-6833(2017)05-0032-07

基于谱聚类算法的城市充换电站分布决策

张忠会, 刘故帅, 熊剑峰, 刘小宛, 徐高超

(南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 城市充换电站的分布一直是电动汽车推广的关键问题之一. 本文在考虑交通流量、距电源点的距离、地块负荷和城市区块定位 4 个指标的情况下, 基于谱聚类算法建立了站址分布决策数学模型. 首先对数据进行无量纲化处理, 建立样本空间矩阵 S . 然后, 利用相似矩阵 W 和度矩阵 D 得到矩阵 S 的规格化 Laplace 矩阵, 将其前 2 个和前 3 个特征向量分别映射到二维和三维坐标, 观察地块分区情况. 最后, 利用 k-means 得到地块分区的谱系图, 并通过节点压降分析验证算法有效性. 算例采用江西某市实际配电网, 研究表明, 该分布决策方法有一定合理性, 为配电网规划提供了一定的经验.

关键词: 谱聚类算法; 充换电站; Laplace 矩阵; 地块分区; 电压偏移量

中图分类号: TM715 文献标志码: A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.05.022

0 引言

环境保护的压力和化石能源紧缺给电动汽车的发展带来了契机,2015 年 7 月我国政府提出在 2020 年完成 1.2 万座充换电站、480 万台充电桩接入需求的配电网建设目标^[1]. 充电设备大规模接入城市配电网,将会对配电网规划产生不可忽视的影响,所以,研究城市充换电站分布决策势在必行.

目前,已有很多研究城市充换电站分布的成果. 在考虑交通流量因素方面,文献[2]采用截流选址模型,提出电动汽车充电需求不是集中在配网节点上,而是在交通网络中流动;文献[3]提出了交通满意度模型,在交通权重距离最小的情况下,对获得最大交通需求量做了研究. 在城市充换电站规划与配电网规划协同方面,文献[4]在考虑建设成本的基础上,同时考虑了系统网损和交通流量,提出交通流量最大往往不能保证系统网损最小;文献[5]在选址时考虑了配电网和充电站建设及运行的双重成本,但是没有将城市配电网进行合理的分区划分. 在研究充电站分布方面,文献[6]从运营商和用户两者利益出发,利用 Voronoi 图自动划分充电站服务范围;文献[7]提出一种两步优化方法,分别研究了充电需求、地理和配电网的电能质量

因素等综合评定优化方案. 文献[8-9]还考虑了充电耗时成本和用户等待成本,但是没有考虑城市的用地性质等因素.

笔者首先以交通流量、距电源点的距离、地块负荷和城市区块定位 4 个指标构成样本空间,将城市配电网进行合理的划分,然后根据地块的指标属性进行聚类,将样本空间的规格化 Laplace 矩阵的前两个和前三个特征向量分别映射到二维和三维坐标中,用相关系数评估分区效果,最后通过 k-means 算法给出地块谱系图,从而得到城市充换电站的分布决策方案.

1 谱聚类算法

谱聚类算法是近年来应用非常广泛的数据分析方法^[10],给定一组数据 x_1, \cdots, x_n , 定义数据 x_i 和 x_j 的相似度为 S_{ij} , 根据样本各自的相似度,将其分成不同的组,同组数据之间相似度高,不同组数据之间相似度低,当数据量较大时,构造相似图 G , G 的每个节点对应 1 个数据点,当 s_{ij} 大于 0 或某一阈值 C 时,将数据 x_i 和 x_j 连接起来,用权重 s_{ij} 表示连接时边的大小. 将相似度高的数据聚在一起,如此重复,直到所有数据聚类完成.

2 谱聚类算法在充换电站分类中的应用

2.1 分类决策指标

决策指标包括交通流量、距电源点的距离、地

收稿日期:2017-04-16;修订日期:2017-05-26

作者简介:张忠会(1962—),男,江西南昌人,南昌大学教授,主要研究方向为电力系统自动检测、控制及规划,E-mail:18979118968@qq.com.

块负荷和城市区块定位 4 个指标,从不同角度对充换电站分布决策进行全面评估.

(1)交通流量

为进行交通流量调研,首先对目标区域进行交通小区划分,划分原则:①小区内土地利用性质相似;②小区边界尽量利用主干道作为界线;③小区面积大小适宜,笔者选择 1 km² 为标准面积.

根据实际调研结果,获得城市道路的交通需求矩阵(\boldsymbol{O} 矩阵),

$$\boldsymbol{O} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n f(i), \tag{1}$$

式中: $f(i)$ 表示交通小区 i 在 t 时刻的交通流量.

(2)距离电源点的距离

距离电源点距离是影响电能质量的重要因素.电动汽车充电负荷集中于配网末端节点时对配网的影响要远大于充电负荷集中分布在电源节点时的影响^[11].

假设第 k 座充换电站的服务半径为 r , r_{\max}^k 表示地块 i 距离最近的电源点的距离,则 $r_i < r_{\max}^k$ 时,地块 i 由第 k 座充换电站服务,因此,相近的地块将由同一充换电站服务,如图 1 所示.处于 r_4 中的地块可以选择处于 r_4 中的充换电站,但不可以选择 r_7 中的充换电站.

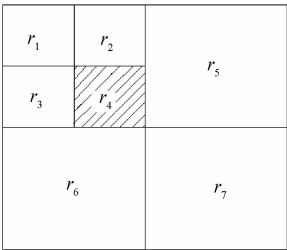


图 1 充换电站服务区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of service area for charging and battery swap station

(3)地块负荷

城市充换电站的规划是配电网规划中的一部分,充换电站的分布需要满足配网规划的整体性和长期性的要求,所以在布点时,需要考虑配网未来的负荷发展情况,满足城市配网发展的需求^[12].

本文中地块负荷 P_i 的预测采用空间负荷预测法,在城市中心地区,35 ~ 110 kV 变电站的配电区域较小,且各小地块的负荷密度具有差异性(区域性发展特点较显著),采用平均负荷密度进行变电站的布点是不科学的,按照地块的

用地性质分析用电性质可以较准确地反映电力需求增长的空间分布.功能块的划分应结合负荷密度以道路及河道为界,功能块的命名为 I、II、III…。然后依据不同用地性质,将功能块分为若干地块,地块的命名为 I -01, I -02、…、II -01、II -02、…、III -01、III -02. 空间负荷预测公式如下:

$$P_i = \rho \frac{\alpha_k s_i}{100}, \tag{2}$$

式中: α_k 表示用地性质为 k 时单位建筑面积负荷指标, kW/ha; ρ 表示负荷同时率; s_i 表示地块 i 的实际地理面积, km².

(4)城市区块定位

根据城市规划设计原则,将城市区块划分为 8 类(即商业、工业、商住、居住、教育、行政、住绿和绿地)作为充换电站分布的划分依据之一.不同用地性质具有不同的规划负荷指标^[13],根据负荷指标制定城市区块指标值如表 1 所示.

表 1 城市区块指标值

Tab.1 Index value of the city block position

区块	商业	工业	商住	居住	教育	行政	住绿	绿地
指标值	9	8	7	6	5	5	3	1

(5)数据归一化处理

为便于叙述,将第 i 项指标原始数据记为 $\{q_i(n)\}_{n=1}^N$,各项指标原始数据量纲不同,数量级差悬殊,为使其具有可比性,首先对原始数据进行归一化处理.笔者采用 min-max 标准化法,归一化之后数据与原始数据具有相同的数据特性.

$$q'_i(n) = \frac{q_i(n) - \min(q_i(n))}{\max(q_i(n)) - \min(q_i(n))}, \tag{3}$$

式中: $q'_i(n)$ 表示归一化之后的数据; $\max(q_i(n))$ 与 $\min(q_i(n))$ 分别表示第 i 项指标原始数据中的最大值和最小值.

2.2 充换电站分布决策

谱聚类算法从低交通流量、城市区块定位、功能块的预测负荷和距离电源点的距离 4 个指标衡量地块的亲属程度,将亲属程度最高的合并为一类,如此重复,直到所有地块都归为一类.

(1)构建 Laplace 矩阵

将归一化处理后的指标数据构成样本空间 \boldsymbol{S} ,然后如公式(4)和(5)所示,构造相似矩阵 \boldsymbol{W} 和度矩阵 \boldsymbol{D} ,由相似矩阵和度矩阵共同得到规格化 Laplace 矩阵,如公式(6)所示.

$$W_{ij} = \begin{cases} 0 & i = j; \\ (S_i - S_j) \times (S_i - S_j)' & i \neq j, \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_i 为矩阵 S 第 i 行向量; S_j 为矩阵 S 第 j 行向量。

$$D_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^n w_{ij}, & i = j; \\ 0, & i \neq j, \end{cases} \quad (5)$$

式中: w_{ij} 是矩阵 W 中的元素。

$$L_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j; \\ -\frac{w_{ij}}{\sqrt{d_i} \sqrt{d_j}}, & i \neq j, \end{cases} \quad (6)$$

式中: d_i 为度矩阵 D 中的元素; L_{ij} 为规格化 Laplace 矩阵 L 中的元素。

(2) 充换电站分布评价函数

为表征充换电站分布好坏,笔者引入相关系数 R ,

$$R = \frac{\sum_{i < j} (W_{ij} - \bar{W}) \sum_{i < j} ((\bar{W}_{ij}) - \bar{\bar{W}})^2}{\sqrt{\sum_{i < j} (W_{ij} - \bar{W})^2 \times \sum_{i < j} ((\bar{W}_{ij}) - \bar{\bar{W}})^2}}, \quad (7)$$

式中: W_{ij} 为向量 i 和向量 j 之间的欧式距离矩阵; \bar{W}_{ij} 为向量 i 和向量 j 之间的相关距离; \bar{W} 和 $\bar{\bar{W}}$ 分别为矩阵 W 和 \bar{W} 的平均值。 R 的大小反映聚类效果好坏, R 越接近 1 说明聚类效果越好。

(3) 谱聚类算法分区流程及算法步骤

谱聚类算法应用于变电站分布决策的步骤如下:

- a) 考虑低交通流量、城市区块定位、功能块的预测负荷和距离电源点的距离 4 个指标建立指标样本空间;
- b) 根据 Euclidean 距离构造样本空间的 Laplace 矩阵;
- c) 计算相关系数, 评估充换电站的分布效果;
- d) 采用 k-means 算法对特征向量进行聚类, 画出分区谱系图, 得到层次分明的充换电站分布决策。

3 充换电站接入对配电网压降的影响

3.1 模型假设

根据未来中国电动汽车的发展趋势^[14], 电动汽车的类型 k 主要分为私家车、公务车、出租车、公交车等。假设不同类型电动汽车的电池容量、单台充电功率、充电开始时间及其分布函

数、起始荷电状态 (state of charge, SOC) 的分布函数等如表 2 所示, 其中 SOC 分布函数均为正态分布函数。

表 2 不同类型电动汽车参数设定
Tab.2 Parameter settings for different types of electric vehicles

电动汽车类型	电池容量/(kW·h)	充电功率/kW	所占比例	充电开始时间	开始时间分布函数
私家车	40	5	0.84	8:00;12:00;18:00	泊松分布;均匀分布
公务车	40	5	0.12	18:00	均匀分布
出租车	40	8	0.03	01:00;12:00	泊松分布;均匀分布
公交车	120	40	0.01	0:00	泊松分布;均匀分布

在没有约束充换电站分布时,假设电动汽车不受约束地随机接入配电网的各个节点,根据以上假设条件,通过以下步骤可得到电动汽车每天的负荷曲线。

(1) 根据渗透率 ε 获得某城市配电网中电动汽车总数量 $n = \frac{\varepsilon p}{\sum_{k=1}^n m_k p_k}$, 然后根据《2013 中国汽车产业发展报告》^[15] 的预测可知不同类型电动汽车的占比 m_k , 从而得到类型 k 的电动汽车的数量 $n_k = m_k \times n$ 。

(2) 以 min 为单位, 计算单位时间内充电负荷, $Y_t = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{n_k} p_k$, 其中, p_k 表示第 k 种车型单位时间内的充电功率。

(3) 计算每天充电负荷 $Y = \sum_t^T Y_t$, 如图 2 所示。

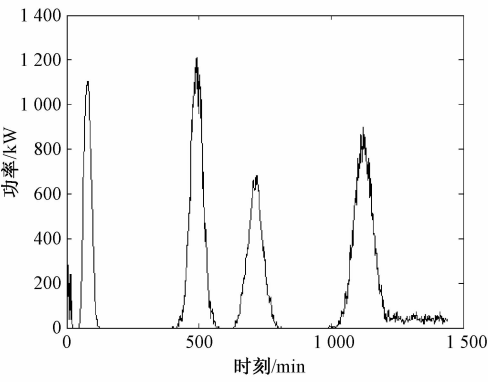


图 2 电动汽车充电负荷曲线
Fig.2 Charging curves of electric vehicle

3.2 节点压降分析

电动汽车充电负荷接入配电网之后节点电压偏移量 ΔU 为

$$\Delta U = \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_i - U_i^{\text{spec}}}{U_i^{\text{spec}}} \right)^2, \tag{8}$$

式中: U_i^{spec} 表示配网节点 i 的电压期望值; U_i 表示节点 i 实际电压值,采用前推回代法计算节点电压. 配网节点电流与节点电压计算公式如下:

$$i_j^* = \frac{P_j^* - jQ_j^*}{U_j^*} + \sum_m^n I_m^*; \tag{9}$$

$$U_j^* = U_i^* - I_j^* \times Z_{ij}^*, \tag{10}$$

式中: $\sum_m^n I_m^*$ 表示节点 j 注入其下一层节点的电流标么值之和; Z_{ij}^* 表示节点 i,j 之间支路阻抗标么值之和.

电压收敛判据为:

$$\max(|U_n^*(k+1) - U_n^*(k)|) < \varepsilon, \tag{11}$$

式中: k 为当前迭代次数.

4 算例分析

笔者采用江西某市为算例,该市三江水南片区有 220 kV 变电站 1 座,110 kV 变电站 1 座,总变电容量为 230 MVA,10 kV 线路 14 条,线路总长度 110.16 km,2014 年片区总负荷 19.14 MW.

4.1 分区过程分析

结合交通小区分区结果和功能块的划分结果得到三江水南片区地块分区结果,如图 3 所示.

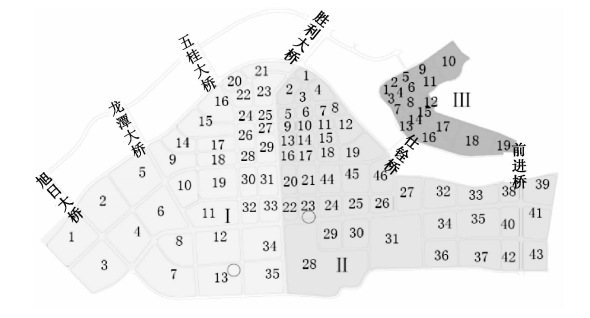


图3 实例地块标号图

Fig.3 Graph labeling of the actual calculation example

由图 3 可知,三江水南片区分为 3 个区,其中 I 区包括 35 个地块,II 区包括 46 个地块,III 区包括 19 个地块.220 kV 变电站与 110 kV 变电站分别位于 I-13 和 II-23.以 I 区为例说明谱聚类算法的应用过程.

三江水南 I 区 4 个指标的原始数据如表 3 所示.笔者采用规格化 Laplace 矩阵,将矩阵的前 2 个和前 3 个特征向量映射到二维和三维空间,同时引入 k-means 算法,清晰地观测地块分区结果,

如图 4 和图 5 所示.

表3 实例 I 区指标数据

Tab.3 Data indicators of 1st partition of the actual calculation example

编号	交通流量/ (百辆/天)	距离电源点的 距离/km	负荷 /MW	城市区 块定位
I-1	1.49	9	0.47	8
I-2	2.53	9	0.42	8
I-3	1.33	9	0.31	8
I-4	2.01	8	0.43	8
I-5	1.41	9	0.44	8
I-6	2.82	6	0.42	8
I-7	1.13	5	0.42	8
I-8	1.78	5	0.47	8
I-9	5.77	8	0.11	6
I-10	5.32	6	0.14	6
I-11	5.27	5	0.20	6
I-12	7.21	2	0.29	6
I-13	6.18	2	0.25	6
I-14	5.24	9	0.15	6
I-15	4.90	9	0.16	6
I-16	10.31	11	0.52	7
I-17	4.56	8	0.11	6
I-18	4.59	7	0.15	6
I-19	4.64	6	0.18	6
I-20	10.06	12	0.54	7
I-21	11.30	13	0.58	9
I-22	11.53	11	0.59	5
I-23	11.39	12	0.54	9
I-24	11.11	10	0.55	9
I-25	10.35	10	0.58	9
I-26	10.63	9	0.54	3
I-27	11.68	9	0.50	9
I-28	8.30	6	0.46	9
I-29	8.66	6	0.49	9
I-30	8.38	6	0.43	9
I-31	8.77	6	0.47	9
I-32	8.35	4	0.43	9
I-33	8.87	4	0.41	9
I-34	6.46	2	0.27	6
I-35	6.11	2	0.22	6

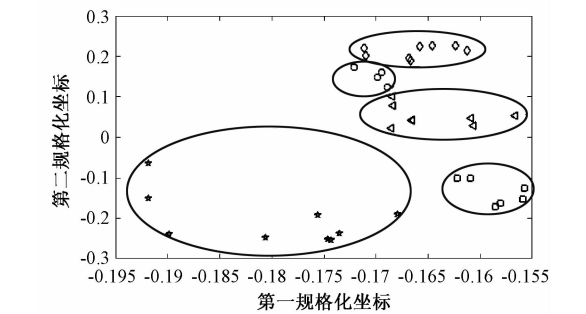


图4 二维特征空间分区聚类结果

Fig.4 Partition results in 2D eigenvector space

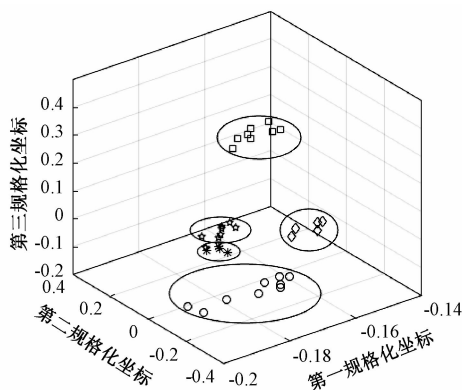


图5 三维特征空间分区聚类结果

Fig.5 Partition results in 3D eigenvector space

从交通流量、城市区块定位、功能块的预测负荷和距离电源点的距离 4 个指标衡量地块的亲属程度,将亲属程度最高的合并为一类,如此重复,直到所有地块都归为一类.分区结果如图 6 所示.

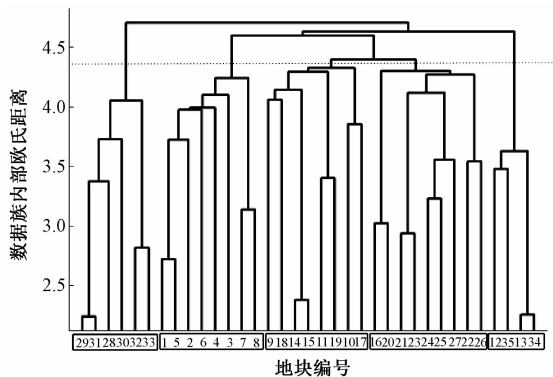


图6 地块分区谱系图

Fig.6 Clusteranalysis dendrogram of parcels

由图 6 可知,通过聚类分析,Ⅰ区 35 个地块划分为 5 个部分,每个部分具有相似的指标特性,由同一座充换电站服务.充换电站分布决策与服务区域划分如图 7 所示.

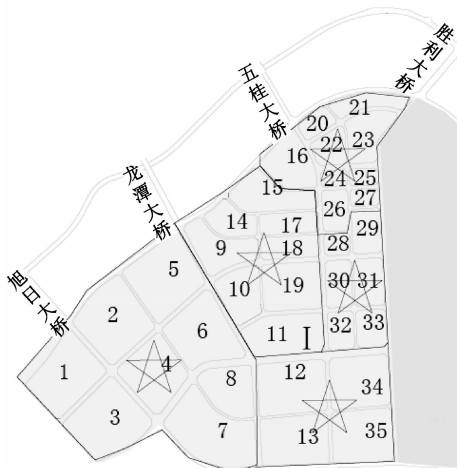


图7 充换电站分布结果及服务区域划分
Fig.7 Results of charging stations location and services division

三江水南Ⅱ区和Ⅲ区计算过程相似,此处省略过程.3 个片区充换电站分布结果如表 4 所示.

表4 分区结果

Tab.4 Results of partition

片区	分区结果	相关系数
Ⅰ区	1-8	0.802 4
	9-11,14,15,17-19	
	16,20-27	
	28-33	
	12,13,34,35	
Ⅱ区	1-19	0.821 8
	20-23;	
	24-26,44-46;	
	27,32,33,38,39;	
	28-31,34-43	
Ⅲ区	1-11	0.869 5
	12-19	

由表 4 可知,三江水南Ⅱ区和Ⅲ区分别由 5 座和 2 座充换电站服务,相关系数均大于 0.8,聚类效果明显.

4.2 Ⅰ区节点压降分析

以三江水南Ⅰ区为例说明优化充换电站分布之后,节点电压的改善情况.该片区 10 kV 主干线 4 条,10 kV 分支线 3 条,其中节点 13 为电源节点,节点拓扑关系如图 8.

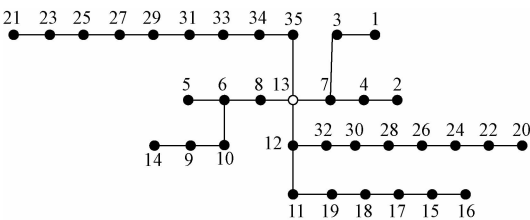


图8 Ⅰ区节点拓扑关系

Fig.8 Topology of bus system of districts one

对于三江水南Ⅰ区,优化充换电站布点之前,电动汽车充电负荷随机接入系统各个节点,采用谱聚类算法得到最优布局之后,电动汽车负荷平均分布在充换电站所在的 5 个节点处,根据公式(8)得到优化前后节点电压降落情况如图 9 所示.

由图 9 可知,相比于充换电站优化前,优化后节点压降平均改善率 1.49%;优化前存在 5 个低电压节点,优化后电压下限节点全部得到改善,说明对配电网进行合理划分之后,充换电站布点得到优化,系统节点电压得到明显改善.

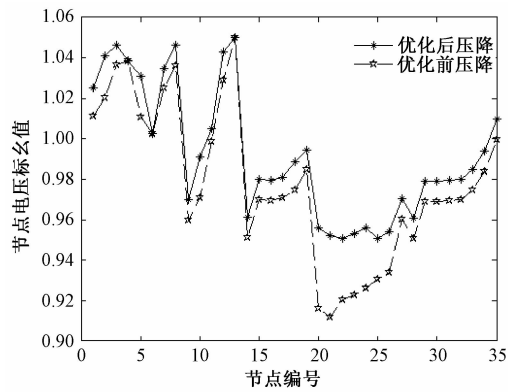


图9 优化前后 I 区节点电压降落情况对比

Fig.9 Compare the voltage drops of before and after optimization by districts one

5 结论

提出一种基于谱聚类算法,考虑多因素的城市充换电站的分布决策方法,得出以下结论:

(1)提出了从交通流量、距电源点的距离、地块负荷和城市区块定位 4 个指标,多个角度对充换电站的分布决策进行全面评估。

(2)提出结合地块负荷密度、道路和河流等自然屏障,将城市配电网进行合理划分,通过对配电网的分区,有利于对配电网的结构分析,理清各区块之间的联络关系,从而正确指导电网建设。

(3)对比传统依据运行人员经验分配充换电站的方法更加全面合理,避免了人为主观因素,为规划人员配置城市充换电站提出有效建议。

(4)同时考虑交通小区分区和功能块分区,使城市分区划分更加合理。

(5)采用相关系数来表征区块内部的聚合程度,用电压降落来评价充换电站布点优化结果,验证了算法具有一定可行性。

参考文献:

[1] 国家能源局. 配电网建设改造行动计划(2015 - 2020) [EB/OL]. [2015 - 07 - 31]. <http://www.nea.gov.cn>.
[2] 王辉,王贵斌,赵俊华,等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):63 - 69.

[3] 刘柏良,黄学良,李军,等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J],电网技术,2015,39(2):450 - 456.
[4] 姚伟锋,赵俊华,文福拴,等. 配电系统与电动汽车充电网络的协调规划[J]. 电力系统自动化,2015,39(9):10 - 18.
[5] 陈婷,卫志农,吴霜,等. 考虑电动汽车充电站选址定容的配电网规划[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(3):1 - 7.
[6] GE S, FENG L, LIU H. The planning of electric vehicle charging station based on grid partition method[C] //Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on. IEEE, 2011: 2726 - 2730.
[7] 高亚静,郭艳东,李天天. 城市电动汽车充电站两步优化选址方法[J]. 中国电力,2013,46(8):143 - 147.
[8] 赵书强,李志伟. 基于差分进化粒子群算法的城市电动汽车充电站最优规划[J]. 华北电力大学学报,2015,42(2):1 - 7.
[9] 熊虎,向铁元,祝勇刚,等. 电动汽车公共充电站布局的最优规划[J]. 电力系统自动化,2013,36(23):65 - 70.
[10] 赵国生,牛贞贞,刘永光,等. 基于自适应模糊 C 均值聚类算法的电力负荷特性分类[J]. 郑州大学学报(工学版),2015,36(6):56 - 60.
[11] 张明霞,田立亭,杨水丽,等. 考虑电动汽车充电负荷空间分布的系统特性分析[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(21):86 - 92.
[12] 蒋建东,杜耀恒,燕跃豪,等. 基于 PMU 的降价二次状态估算法研究[J]. 郑州大学学报(工学版),2017,38(2):50 - 54.
[13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50293 - 2014 城市电力规划规范[S]. 北京:标准出版社,2014.
[14] 张洪财,胡泽春,宋永华,等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):13 - 20.
[15] 国务院发展研究中心产业经济研究部,中国汽车工程学会,大众汽车集团(中国). 中国汽车产业发展报告(2013)[R]. 北京:社会科学文献出版社,2013.

The Application of Spectral Clustering Algorithm to Distributive Decision for Charging and Battery Swap Station

ZHANG Zhonghui, LIU Gushuai, XIONG Jianfeng, LIU Xiaowan, XU Gaochao

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031 , China)

Abstract: The distribution of charging and battery swap station has always been one of the key problems for the development of electric vehicle. A site location of charging and battery swap station could be represented by a network with traffic flow , the distance from the power source , parcel load , and city block position respectively. Spectral clustering methodology was used to reveal the internal connectivity structure of such a network. First of all , it adopted the min-max standardized method in dimensionless to establish a sample space matrix S. Then , the normalized Laplacian was achieved according to the similarity between matrix W and matrix D. The former two and three feature vector of Laplace matrix were mapped to the 2d and 3d space to observe parcel partition. Finally methodology goes beyond the standard k-means algorithm by instead representing the complete network substructure as a dendrogram and verifies its correctness by analyzing the voltage sags. We include the results of our methodology for a real distribution network in Jiangxi province. Example shows that our methodology has certain rationality and it could be helpful for distribution network planning.

Key words: spectral clustering; charging and battery swap station; laplace matrix; parcel partition; voltage offset

(上接第 31 页)

Multi-sensor Information Fusion Technology in the Measurement of Weld Penetration

LIU Guangrui, ZHOU Wenbo, TIAN Xin, GUO Kefu

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001 , China)

Abstract: BP neural network for effectively fusioning the information obtained by arc sensor and ultrasonic sensor and information of welding parameters such as welding current , welding speed , welding groove and so on was used to obtain the prediction model of weld penetration depth. Simulation results showed that ; the prediction model of weld penetration depth could measure the weld penetration quickly , accurately and in real time. For the precise control of weld penetration , parameters self-tuning fuzzy PID controller was desing , which combined with the advantages of traditional PID controller and fuzzy controller. Smulation results showed that compared with traditional PID controller , parameters self-tuning fuzzy PID controller had a significant advantage in the performance of the system.

Key words: arc sensor; ultrasonic sensor; information fusion; BP neural network; parameters self tuning fuzzy PID controller