基于复杂网络理论的城区电动汽车充电服务网络规划布局研究

电动汽车的发展与充换电服务网络相辅相成，城市充电服务网络规划与布局亟待科学方法作为支撑。以复杂网络理论在电力系统的应用为基础，采用复杂网络理论中度、网络模块度指标以及社团分区方法，对城市交通网络进行区域划分，作为充电网络规划以及充电点设置的依据。以四川省泸州市城区交通网络为例，建立其对应的复杂网络模型，并针对实时道路交通情况，定义电动汽车续航期望时间，以代替传统复杂网络的边权。在不同程度投资的条件下，获得具有符合实际道路交通情况的网络区域划分，为在城区设置充电点，布局充电服务网络提供科学依据。

刁　塑　韩安兵　夏志军　李学忠　黄科融／国网泸州供电公司

刁　塑／助理工程师

关键词／Keywords
电动汽车·
复杂网络·
充电服务网络·

0　引言

目前电动汽车发展迅速，由于其排放低、噪声低和能量转化率高等特点，电动汽车受到社会各界的广泛关注[1]。按照目前的发展态势，未来若干年内，纯电动汽车以及混合动力汽车将会逐渐成为主流交通工具。而电动汽车的发展必须以充换电服务网络作为其支撑，但目前电动汽车充换电设施建设相对滞后，或将成为制约电动汽车行业发展的瓶颈。充换电服务网络的科学布局与规划，一直是电动汽车研究方向的重要内容。

目前对于城市内的充电网络布局规划研究还处于初级阶段，研究仍然不够深入与完善，尚没有建立起较为完整的理论体系。文献[2]分析了影响充电站规划布局的因素，简要论述了充电服务网络的规划原则。文献[3]阐述了电动汽车充电设施建设与运行应分为示范、公益以及商业运行三个阶段，并根据每阶段的特点定义了充电设施规划的原则和模型。文献[4]建立了电动汽车充电站规划的最大收益模型。文献[5]定义了续航风险距离、续航能量密度以及网络服务能力等指标，用于体现换电站距离、电池分布等因素对于充换电网络整体服务能力的影响。

本文以复杂网络理论中社团分区算法为基础，以泸州市城区交通网络为例，进行充电服务网络区域划分，以不同初始投资为前提，计算出最优的充电点布局规划参考区域，以降低电动汽车在城区需要充电时的续航期望时间，提高电动汽车用户实际体验，为城市充电服务网络的规划提供一种科学方法。

1　复杂网络理论

复杂网络理论在电力系统方面的研究始于21世纪初，主要是以20世纪末的两篇重要文章为标志：一篇是1998年6月美国学者Watts和Strogatz发表在Nature杂志上的名为《Collective Dynamics of 'Small-World' Networks》的论文，文中首次揭示了美国西部电网的小世界特性[6]。另一篇是《Emergence of scaling in random network》，该篇文章是1999年10月美国学者Albert和Barabisi发表于Science杂志上的，文章揭示了美国电网的无标度特性[7]，认为美国电网是无标度网络。

网络是描述自然和工程系统的模型。网络可以看作是具有一定特征和功能的基本个体的集合。复杂网络理论的应用涉及到交通、互联网、医学和电力

等不同的专业，为了更好地描述不同网络的共同特征，一些特征概念也被学者提出来，如度数、度分布、平均路径长度、聚类系数以及介数等。此处介绍与本文相关的两个概念。

1）节点i的度数k_i定义为与该节点连接的边数。对所有节点的度数k_i求和后再取平均值则可以得到网络的平均度数k。

2）网络模块度指标Q。模块度指标是评价一个复杂网络中社团强弱特性的参数，其定义为[8]

$$Q=\frac{1}{2m}\sum_{ij}\left(A_{ij}-\frac{k_i k_j}{2m}\right)\delta(C_i,C_j) \qquad (1)$$

式中，C_i为节点i所属的社团；m为网络总边数，当$C_i=C_j$时$\delta(C_i,C_j)=1$，否则为0。

复杂网络中的社团概念是基于实际网络出发的，在真实的网络中，以社交网络为例，有相同爱好或共同理想的人往往觉得彼此“距离很近”，容易群聚在一起，而与这个“圈子”以外其他“圈子”保持一定距离。并交通网络更加明显，城市与城市之间以较长的交通干道联系在一起，城市内部也会划分出不同的区域。在复杂网络中，聚集在一起的节点，就可以成为社团。通常而言，社团内部（区域内部）的节点具有较为紧密的联系，在某种程度上，它们“距离”比较近。

2 城区交通网复杂网络建模及分析

2.1 复杂网络建模

要运用复杂网络理论进行电动汽车充电网络进行分析，首先要基于交通网络进行复杂网络建模，本文以四川省泸州市城区交通网络为例，主要选取江阳区、龙马潭区重要交通干道（一环路）及其周围重要交通枢纽进行分析。

在江阳区、龙马潭区选取共计23个点，以此构成复杂网络中的节点，如图1所示。实际位置及编号如表1所示。

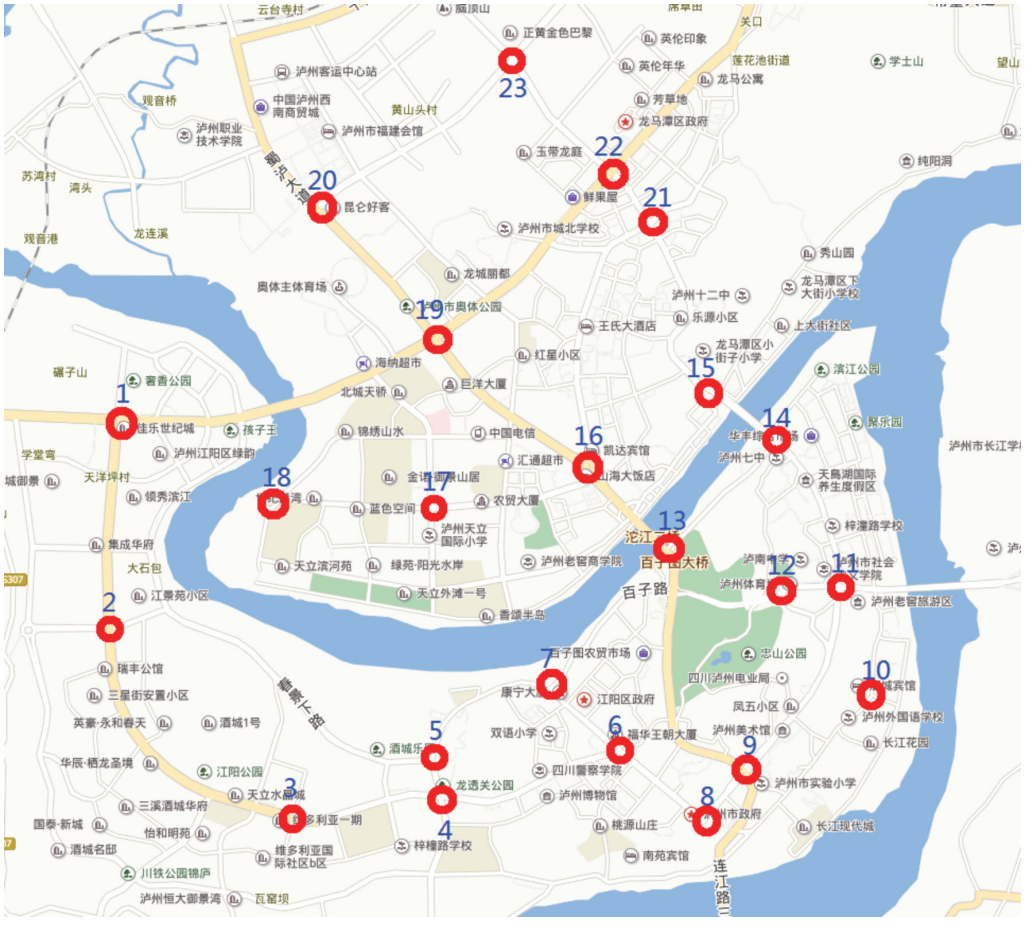

图1 泸州市城区道路交通复杂网络节点图

表1　泸州市城区复杂网络节点编号及对应实际地址

编号	实际地址	编号	实际地址
1	佳乐世纪城	13	沱江二桥南
2	龙祥西路与酒城大道三段交汇口	14	江城
3	维多利亚	15	回龙湾
4	龙头关	16	山海大酒店
5	酒城乐园	17	泸州市政协
6	天益广场	18	木岩
7	百子图广场	19	奥体公园
8	泸州市政府	20	西南医科大学（新校区）北门
9	泸州市中医院	21	春雨路与龙南路交汇口
10	酒城宾馆	22	春雨路与龙马大道二段交汇口
11	国窖大桥	23	春雨路与金带路交汇口
12	广场		

在加权复杂网络中，边一般具有权重，可以用于表示距离、重要程度等。根据实际道路连接关系，确定共计38条道路，以此构成复杂网络中的边，并以实际道路距离，作为其边的权重，如图2所示。

在电力系统的复杂网络分析中，常常以线路的阻抗作为边的权重，以此表示输电线路的距离。而在城市汽车交通网中，距离虽然可以直接反映节点间的距离，但是由于城市交通具有实时性、阻塞性，单纯使用道路距离作为边权，并不能作为电动汽车充电网络的分析基础。原因在于如果仅考虑实际距离，则可能出现即使距离充电服务点很近，但道路拥挤程度较高，仍然不能尽快到达最近的充电点，影响服务质量与用户体验。

图2　泸州市城区道路交通复杂网络加权边图

故而必须考虑道路实时状态来重新定义边权，由于统计泸州全天候道路交通信息量太大，故本文选择以早上9：00为例，进行道路交通情况分析。以严重阻塞、阻塞和正常三种情况对当前交通道路情况进行评价。如图3所示，其中红色代表严重阻塞，黄色代表阻塞，绿色代表正常。

图3　泸州市城区道路阻塞情况局部图

统计所有道路情况如表2所示。定义T为电动汽车续航期望时间，如式（2）所示，表示参与交通的电动汽车，在节点间行驶时所需的时间，并作为节点对的边权，以此考虑道路实时状态对于电动汽车寻找充电点的影响。

$$T=\frac{D}{S_{\text{avg}}} \tag{2}$$

式中，D为原始边权，即节点对间的距离；S_{avg}为当前节点对间电动汽车的行车速度，在本文中约定，若路况为正常，则取$S_{\text{avg}}=20$ km/h；若路况为阻塞，则取$S_{\text{avg}}=10$ km/h；若路况为严重阻塞，则取$S_{\text{avg}}=5$ km/h。

2.2　基于网络社团理论的充电网络分区

在电动汽车充电服务网络逐步建立的前期，投资必然是有限的，充电点的增加理应与当地电动汽车的数量规模相适应。但最初的充电网络布局规划，则需要在投资一定的前提下，尽量多地服务电动汽车。对于电动汽车用户而言，则是总能够在尽量短的时间内到达最近的充电服务点。

表2　泸州市城区道路阻塞情况统计表

首节点编号	末节点编号	距离/m	路况	T/min	首节点编号	末节点编号	距离/m	路况	T/min
1	2	1 400	正常	4.2	11	14	1 100	阻塞	6.6
1	19	2 200	正常	6.6	12	13	1 000	正常	3
2	3	1 900	正常	5.7	12	14	1 400	严重阻塞	16.8
2	5	2 500	正常	7.5	13	14	1 000	正常	3
3	4	975	正常	2.925	13	16	799	严重阻塞	9.588
3	5	1 100	正常	3.3	14	15	592	阻塞	3.552
4	5	241	正常	0.723	15	16	1 400	阻塞	8.4
4	6	1 200	正常	3.6	15	21	1 300	正常	3.9
5	7	1 000	阻塞	6	16	19	1 400	正常	4.2
6	7	1 200	正常	3.6	16	17	1 100	正常	3.3
6	8	720	正常	2.16	16	21	1 800	正常	5.4
6	9	1 100	正常	3.3	17	19	1 500	阻塞	9
6	13	1 600	正常	4.8	17	18	1 000	正常	3
8	9	417	正常	1.251	18	19	2 200	正常	6.6
9	10	1 200	正常	3.6	19	20	1 300	正常	3.9
9	11	1 800	正常	5.4	19	22	1 600	正常	4.8
9	13	1 800	正常	5.4	20	23	1 600	正常	4.8
10	11	900	正常	2.7	21	22	431	阻塞	2.586
11	12	339	正常	1.017	22	23	1 000	正常	3

本文提出以下研究思路：对于固定的投资而言，设置的充电服务点数量必然有限，那么如果能够将交通网络划分成一些较为独立的区域，在这些区域内设置充电服务点，保证一个区域内部的电动汽车能够尽快到达充电服务点，那么就能够最大程度地发挥充电服务点的作用。如何合理地划分出一个充电服务点的区域则是问题的关键，本文受复杂网络理论中社团概念的启发，拟采用社团分区这一概念与算法解决这一问题。

在上文已建立泸州城区交通复杂网络模型的基础上，采用社团分区算法[9]，对建模后的交通网进行区域划分，使得在每个区域内部的节点形成较为紧密的社团。当电动汽车行驶在某个区域内部时，可以在最短时间内寻找到充电服务点，而分区的数量则根据投资，可进行动态调节。

首先进行算法第一阶段，进行分区初始化，网络中每个节点均分配一个社团编号，则每个节点自己形成一个区域。然后对任意节点i、j，根据式（3）计算当i加入到它每个邻居节点所在的社团时，对应的模块度的增量ΔQ，即

$$\Delta Q=\left[\frac{\sum_{\text{in}}+w_{i,\text{in}}}{2m}-\left(\frac{\sum_{\text{tot}}+w_i}{2m}\right)^2\right]-\left[\frac{\sum_{\text{in}}}{2m}-\left(\frac{\sum_{\text{tot}}}{2m}\right)^2-\left(\frac{w_i}{2m}\right)^2\right] \tag{3}$$

式中，$\sum_{\text{in}}$为社团内部所有边的权重之和；$\sum_{\text{tot}}$为所有与社团内部节点相关联的边的权重之和；W_i为所有与节点i相关联的边的权重之和；$W_{i,\text{in}}$为节点i与社团C相连接的所有边的权重之和。

当$\Delta Q\geqslant 0$时，选择对应最大值的邻居节点所在社区，使i加入其中；当$\Delta Q<0$时，则i保留当前所在社区。一直循环之前的做法，使得网络不再出现合并的现象。

然后进行算法第二阶段，即把刚才剩余的社区，看成一个节点，社区之间相连的关系，看作新“节点”的边，然后按第一阶段算法进行分区，直到无法再划分出跟高一层次的社区为止。

使用上述算法针对所构建的模型进行分区，在确定一定的模块度前提下，可以选择分区数量并获得泸州城区的交通网络分区图。

2.3 城区充电网络布局规划分析

本文模拟在不同投资（以充电点数量代替具体投资金额）的情况下，充电点的布局规划设置情况，通过调节模块度指标Q，获得在充电点数量分别为4、5、6和7个时，泸州城区交通复杂网络的区域划分情况。

首先，按2.2节的算法，对泸州城区复杂网络进行计算，区域划分结果详细情况如下。

（1）1号方案

充电点数量为4时，充电区域划分情况如图4所示。

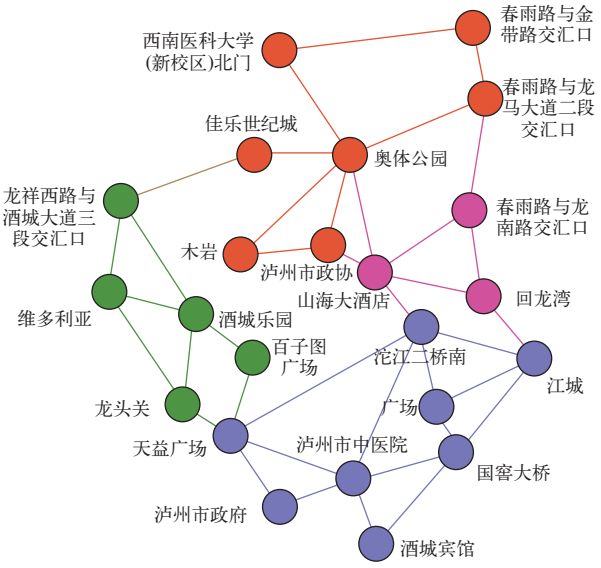

图4 1号方案充电点区域划分图

其中主要将江阳区分为城西与老城区两个区域，龙马潭区则以回龙湾、沱江二桥北为一个区域，主要原因是由于该区域长期拥堵，造成电动汽车续航期望时间较长，在较小的一个区域内也需要设置充电点，剩余的城北部分则另作为一个区域，具体节点划分情况如表3所示。

（2）2号方案

充电点数量为5时，充电区域划分情况如图5所示。

相比与1号方案，2号方案增加的一个充电点则应设置在为以广场、国窖大桥和江城为顶点的三角形区域附近，与实际情况也较为相符，该区

表3 1号方案区域划分节点表

区域序号	区域内节点（充电服务点参考设置区域）
1	龙祥西路与酒城大道三段交汇口、维多利亚、龙头关、酒城乐园和百子图广场
2	天益广场、泸州市政府、泸州市中医院、酒城宾馆、国窖大桥、广场、沱江二桥南和江城
3	山海大酒店、春雨路与龙南路交汇口和回龙湾
4	佳乐世纪城、泸州市政协、木岩、奥体公园、西南医科大学（新校区）北门、春雨路与龙马大道二段交汇口和春雨路与金带路交汇口

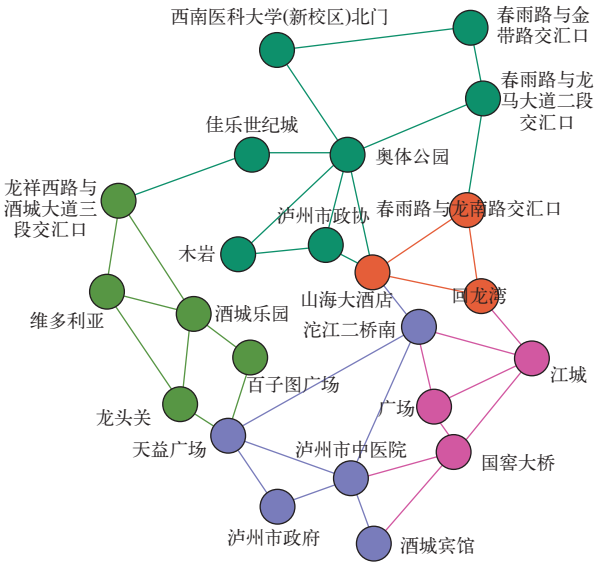

图5 2号方案充电点区域划分图

域是城市中心区域，车流量较大，特别是广场至江城、国窖大桥至江城的道路较为拥挤，附近设置有充电点，可以大幅减小电动汽车续航期望时间，具体节点划分情况如表4所示。

表4 2号方案区域划分节点表

区域序号	区域内节点（充电服务点参考设置区域）
1	龙祥西路与酒城大道三段交汇口、维多利亚、龙头关、酒城乐园和百子图广场
2	天益广场、泸州市政府、泸州市中医院、酒城宾馆和沱江二桥南
3	江城、国窖大桥和广场
4	山海大酒店、春雨路与龙南路交汇口和回龙湾
5	佳乐世纪城、泸州市政协、木岩、奥体公园、西南医科大学（新校区）北门、春雨路与龙马大道二段交汇口和春雨路与金带路交汇口

（3）3号方案

充电点数量为6时，充电区域划分情况如图6所示。

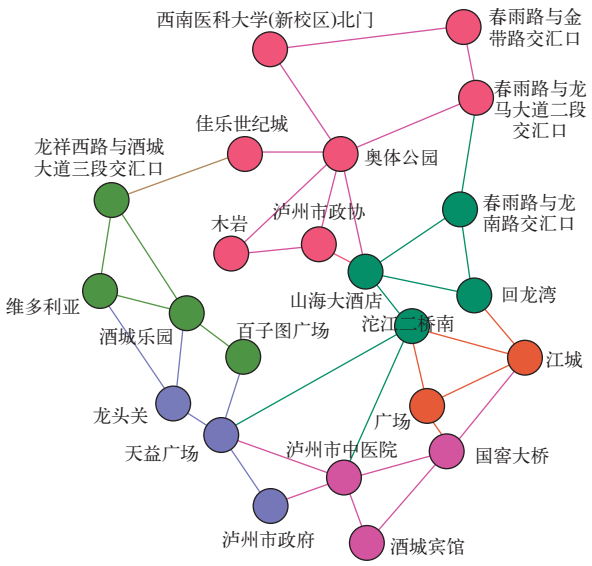

图6 3号方案充电点区域划分图

相比与2号方案，3号方案增加的一个充电点则应设置在为以国窖大桥、泸州市中医院以及酒城宾馆为顶点的三角形区域附近，具体节点划分情况如表5所示。

表5 3号方案区域划分节点表

区域序号	区域内节点（充电服务点参考设置区域）
1	龙祥西路与酒城大道三段交汇口、维多利亚、酒城乐园和百子图广场
2	龙头关、天益广场和泸州市政府
3	泸州市中医院、酒城宾馆和国窖大桥
4	江城、广场
5	沱江二桥南、山海大酒店、春雨路与龙南路交汇口和回龙湾
6	佳乐世纪城、泸州市政协、木岩、奥体公园、西南医科大学（新校区）北门、春雨路与龙马大道二段交汇口和春雨路与金带路交汇口

（4）4号方案

充电点数量为7时，充电区域划分情况如图7所示。

4号方案则在3号方案的基础上将佳乐世纪城、奥体公园、木岩以及泸州市政协划分为新的区域，具体节点划分情况如表6所示。

以上4种方案分别将泸州城区划分为4、5、6和7个区域，社团分区算法的划分，可以保证了区域内部节点间的紧密性，而充电服务点则可以根

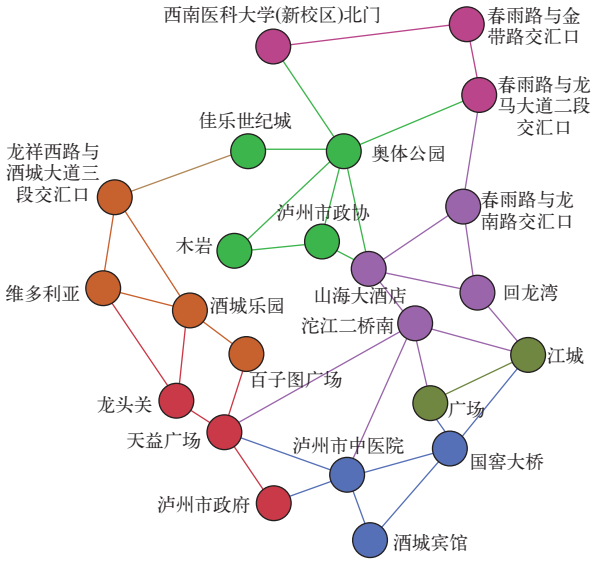

图7 4号方案充电点区域划分图

表6 4号方案区域划分节点表

区域序号	区域内节点（充电服务点参考设置区域）
1	龙祥西路与酒城大道三段交汇口、维多利亚、酒城乐园和百子图广场
2	龙头关、天益广场和泸州市政府
3	泸州市中医院、酒城宾馆和国窖大桥
4	江城、广场
5	沱江二桥南、山海大酒店、春雨路与龙南路交汇口和回龙湾
6	佳乐世纪城、泸州市政协、木岩和奥体公园
7	西南医科大学（新校区）北门、春雨路与龙马大道二段交汇口和春雨路与金带路交汇口

据区域划分情况，在一个区域内选择适当的位置设置充电服务点，即可使得在该区域内部的电动汽车能够以最短的时间前往附近的充电服务点。

3 结束语

本文以复杂网络为理论基础，对四川省泸州市城区交通网络建模，并根据实际道路交通情况，以电动汽车续航期望时间作为边权，反映了城区交通网络的客观情况。基于社团分区方法的启发，以不同充电服务点作为调节网络模块度的依据，对泸州城区交通网络进行划分。最后得出在不同投资前提下的，充电服务点建设的参考区域。

由于本文仅涉及城区交通规划，暂不考虑电动汽车长距离续航布局规划的问题。同时，如果深入考虑交通流、充电服务点容量等问题，将使得研究更加符合实际情况。在后续的研究中，可以扩大建模的区域，考虑车辆交通流分布与充电点服务容量等问题的交互等，使研究成果能够真正投入实际应用。

参考文献

[1] Hanif Livani，Student Member，Yaman Evr Enosoglu C，et al．A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines [J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2014，5 (1)：51．

[2] 徐凡，俞国勤，顾临峰，等．电动汽车充电站布局规划浅析 [J]．华东电力，2009，37 (10)：1678-1682．

[3] 吴春阳，黎灿兵，杜力，等．电动汽车充电设施规划方法 [J]．电力系统自动化，2010，34 (24)：36-39．

[4] 唐现刚，刘俊勇，刘友波，等．基于计算几何方法的电动汽车充电站规划 [J]．电力系统自动化，2012，36 (8)：24-30．

[5] 薛飞，雷宪章，张野飚，等．基于复杂网络的电动汽车智能充换电服务网络评估方法 [J]．电网技术，2012，36 (9)：20-24．

[6] Watts D J，Strogatz S H．Collective dynamics of “small-world” networks [J]．Nature，1998，393 (6684)：440-442．

[7] Barabasi A L，Albert R．Emergence of Scaling in Random Networks [J]．Science，1999，286 (5439)：509-512．

[8] Evans T S，Lambiotte R．Line graphs，link partitions，and overlapping communities [J]．Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics，2009，80 (1)：145-148．

[9] Blondel V D，Guillaume J L，Lambiotte R，et al．Fast unfolding of communities in large networks [J]．Journal of Statistical Mechanics Theory & Experiment，2008 (10)：155-168．

（收稿日期：2017－02－07）EA