电动汽车充电站最优分布和规模研究

任玉珑[1]，史乐峰[1]，张　谦[2]，韩维建[1]，黄守军[1]
（1. 重庆大学经济与工商管理学院，重庆市 400030；
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室，重庆大学，重庆市 400044）

摘要：为未来电动汽车充电站建设提供研究思路和理论支持，文中运用动态交通网络思想建立了基于硬时间窗约束下的充电站布局及最佳规模确定的多目标优化模型，该模型将充电者充电成本和充电站投资者成本最小化作为优化目标。提出了求解该模型的两阶段启发式算法。在此基础上，通过一个算例验证了所提模型的准确性和有效性。

关键词：电动汽车；动态交通流；充电站；布局；规模

0　引言

随着中国经济的发展和人民收入水平的提高，国内对家用轿车的需求正日趋旺盛。该局面在改善中国居民出行方式，推动汽车产业发展方面具有一定的积极意义，但也对能源安全、环境保护等方面造成了负面影响。为此，中国将扶持电动汽车产业发展作为未来汽车产业发展方向，并出台了一系列激励性政策鼓励电动汽车消费，各地也纷纷为电动汽车建立充电站，以促进电动汽车的市场推广。但当前中国的充电站建设仍以市场示范为主，缺乏一套充电站布局和规模设定的理论工具，此方面研究也尚未受到学术界的广泛关注。

文献[1]认为充电站的建设应考虑到供电可靠性、建设规模、建设成本等。文献[2]提出一种适用于快速充电站的充电管理系统设计方案，并通过仿真试验证明其有效性。文献[3]认为衡量充电站需求的主要指标是交通量与服务半径 2 个要素，同时还应考虑交通、环保及区域配电能力等外部环境条件和该地区的建设规划与路网规划等。文献[4]利用 4 个区域的基础数据进行仿真试验后发现，区域电力系统特性将影响充电站的正常运营。上述文献多将电动汽车充电站视为一种普通电力基础设施，忽视了其公共服务性的要求。充电站投资方在充电站选址和规模确定方面，不仅要考虑诸如拟选择区域的土地购置价格和电网改造成本等，还应将满足充电者最大充电需求作为目标，将充电者充电过程中路上行驶时间和充电时间考虑在内，特别是在电动汽车推广的初期阶段，充电的便捷程度更是电动汽车潜在购买者关注的因素之一。

本文采用动态网络均衡思想将电动汽车充电需求随时间变化的特性考虑在内[5]。研究的目标就是建立考虑不同地点充电者充电成本最小和充电站投资方投入成本最小的多目标优化模型，对上述问题进行描述，以此为基础提出相应的算法，最后进行算例验证。

1　充电站与充电者成本关系描述

电动汽车充电站选址与规模的确定与普通电力基础设施规划、建设的最大区别在于：既要考虑因电网改建、土地购置、环境治理等所带来的成本，还要考虑充电站建成后的社会效益。如图 1 所示，充电站设置在不同地点、建设不同的规模，将直接影响到充电者的路上行驶成本（路上行驶耗时）和充电等待成本（充电者排队等待耗时）。

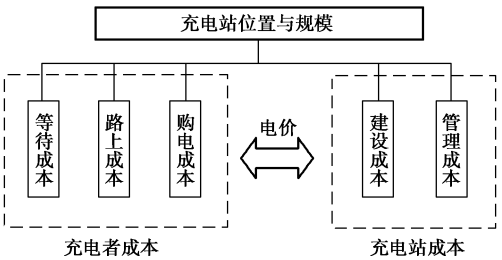

图 1　充电站与充电者成本示意
Fig. 1　Illustration of cost of charging station and electric vehicle charger

同时电动汽车充电电价将对充电者购电成本造成影响[6]，因而充电站的选址和规模确定必须考虑充电公司和充电者 2 个方面利益，将总社会成本最

收稿日期：2010-10-22；修回日期：2011-05-19。
输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室资助项目（2007DA10512710501）；中央高校基本科研业务费专项基金资助（CDJRC10150002，CDJXS11020003）。

小作为目标进行分析。本文假设所有充电站均由1个充电公司投资建立并负责运营，不考虑充电站间的竞争关系。

图1中充电者成本包括从出发地到达充电站所在地路上耗时造成的成本、到达充电站后排队耗时造成的等待成本以及充电者为电动汽车充电的购电成本；而充电公司成本包括充电站投入成本和由于电动汽车充电造成的可变管理成本（充电站内员工的工资、充电站从所在地电网公司购电的成本等）。

2　模型构建

假设 N 为将研究区域内各候选充电站建设点抽象后的交通网络节点集合，每个节点代表一个电动汽车聚集区域；$r(r\in N)$ 为交通网络中的任一节点；$S(S\subset N)$ 为含有充电站的节点集合；$s(s\in S)$ 为任一含充电站的节点；P_{rs} 为节点 r 到节点 s 的所有路径的集合；$p(p\in P_{rs})$ 为其中某一条路径。考虑某一固定时间段 $[0,T]$，该时间段内所有待充电电动汽车的充电需求都能得到满足。

同时考虑电动汽车尚处于市场展示和推广阶段，充电的便利程度将直接影响到消费者对电动汽车的购买行为，也关系到中国的电动汽车战略能否顺利推行。本文将电动汽车总耗时（包括路上行驶时间、等待排队时间和充电时间）设定在一硬时间窗 $[0,\tau](\tau>0)$ 内来讨论。

2.1　充电路径和充电站的选择

由于电动汽车还未普及，尚缺乏关于充电者行为的总结与分析。假设未来充电者的决策行为大体与交通出行者对目的地、路径的选择特点相似。充电者对充电站和充电路径的选择是在参考自己的经验和外界信息后确定的[7]。不同充电时间，选择不同的目标充电站及路径会产生不同的充电成本，详见下式：

$$\begin{cases} C_{p,rs}(t)=Jv(t+\tau_{p,rs}(t))+\beta_{s,r}\tau_s(t+\\ \qquad \tau_{p,rs}(t))+\beta_{p,r}\tau_{p,rs}(t) \\ \text{s.t.}\ \ \beta_p>0 \\ \qquad \beta_s>0 \end{cases} \tag{1}$$

式中：$C_{p,rs}(t)$ 为充电者在 t 时刻由 r 点出发经路径 p，到 s 点充电的总成本；J 为充电电价，为充电公司总投入成本折算后的值；$\tau_{p,rs}(t)$ 为 t 时刻电动汽车由 r 点出发到 s 点，在路径 p 上所需耗费的时间，设 s 点内电动汽车到本区域充电的路上耗时为0；$t+\tau_{p,rs}(t)$ 为充电者到达 s 点的时刻；$v(t+\tau_{p,rs}(t))$ 为电动汽车到达充电站时的电能需求量；$\tau_s(t+\tau_{p,rs}(t))$ 为电动汽车的充电站耗时（包括排队耗时和充电耗时）；$\beta_{p,r}$ 和 $\beta_{s,r}$ 分别为路上耗时和充电站耗时的时间成本折算系数。

式(1)中等号右边第1项为充电者的购电成本，后2项分别为充电者的等待成本和路上成本。本文假设所有电动汽车到达充电站时的电能需求量 v 固定，充电机充电功率恒定为 η，故电动汽车的充电耗时恒为 v/η。

由上述条件可得充电者充电行为的动态最优条件定义。

定义1：在任意 r 点内电动汽车在任一 t 时刻，对 s 点及路径 p 的选择所导致的充电成本都等于其最小充电成本，所有未被选择的充电站、路径所导致的充电成本都不小于该充电成本[8]。可用数学表达式表示为：

$$C_{rs,\min}=\inf\{C_{p,rs}(t)\mid p\in P_{rs},t\in[0,T],\\ s\in S,r\in N\} \tag{2}$$

2.2　电动汽车充电站规模和布局

2.2.1　充电站的规模

电动汽车在 t 时刻到达充电站的充电站耗时 $\tau_s(t)$，主要受 s 点充电站内充电机台数 g_s 和待充电电动汽车量 $x_{s,s}(t)$ 的影响。当 $x_{s,s}(t)\leqslant g_s$ 时，$\tau_s(t)=v/\eta$；当 $x_{s,s}(t)>g_s$ 时，充电站内会形成充电队列，此时电动汽车的最大充电站耗时为：

$$\tau_s(t)=\left\lceil\frac{x_{s,s}(t)}{g_s}\right\rceil\frac{v}{\eta}+\frac{v}{\eta} \tag{3}$$

式中：$\lceil\cdot\rceil$ 表示向上取整数。

式(3)等号右边第1项表示待充电电动汽车的排队耗时，第2项为充电耗时。

t 时刻因电动汽车充电导致的充电站对电网的负荷需求可表示为：

$$Q_s(t)=\begin{cases} x_{s,s}(t)\eta & x_{s,s}(t)<g_s \\ g_s\eta & x_{s,s}(t)\geqslant g_s \end{cases} \tag{4}$$

式中：$Q_s(t)$ 为在 t 时刻，s 点充电站因电动汽车充电引起的对电网的负荷需求。

当电动汽车数量小于充电机数量时，s 点充电站对电网的负荷需求等于工作充电机数量与充电功率的乘积；反之充电站对电网负荷需求等于全部充电机同时工作时的功率需求。以此可推知 $[0,T]$ 时段，电动汽车总电能需求 D 为：

$$D=\sum_s D_s=\sum_s\int_0^T Q_s(t)\mathrm{d}t \qquad s\in S \tag{5}$$

电动汽车充电站规模的设定直接影响到充电站在 $[0,T]$ 时段内的可变管理成本（充电站内员工的工资、充电站从所在地电网公司购电的成本等），该部分成本可表示为：

$$K_{sv}=\int_0^T k_{sv}Q_s(t)\mathrm{d}t \qquad s\in S \tag{6}$$

式中：K_{sv}为 s 点充电站在$[0,T]$时段内的可变成本；k_{sv}为充电负荷导致的平均成本，即充电公司向电网公司支付的购电电价、充电负荷造成的电网治理成本和充电站其他管理成本的和。

2.2.2 充电站布局和充电电价设定

当电动汽车电能需求 D 固定时，充电站的布局直接影响到充电公司的投入成本和对充电电价的设定。电动汽车充电站的大部分成本主要来自于添置充电机导致的充电站规模扩建成本、变压器增容成本、智能控制设备成本等。充电公司通过设定电动汽车充电电价回收上述成本，详见式(7)、式(8)。

$$K_s=K_{sf}+K_{sv}=k_{sf}g_s+\int_0^T k_{sv}Q_s(t)\mathrm{d}t \qquad s\in S \tag{7}$$

式中：K_s 为将充电站设在 s 点后，充电公司在$[0,T]$时段内付出的总成本；K_{sf}为 s 点充电站建设的固定成本投入；K_{sv}为 s 点充电站的可变成本投入；k_{sf}为在 s 点建立充电站所需投入的平均固定成本[9]（折算到$[0,T]$时段后，单台充电机对应的平均固定成本投入），因各地区电网的坚强程度、变压器变压能力等因素的影响使 k_{sf}随所建地点、充电机数量的改变而变化[10]。

已知充电站成本函数后，可推知充电公司对充电电价 J 的制定遵循以下策略：

$$J=(1+R)\frac{K}{D}=(1+R)\frac{\sum_{s\in S}K_s}{D} \qquad 0\leqslant R\leqslant 1 \tag{8}$$

式中：$K=\sum_{s\in S}K_s$ 为充电公司的总成本投入；R 为成本加成系数。

式(8)假设充电公司采取成本加成的价格策略，在售电收入可弥补投资成本前提下，保留一定的利润收益。

2.3 目标函数

如前所述电动汽车充电站的布局与规模不仅决定了充电公司总的投入成本，同时影响到不同区域（r 点）到充电站（s 点）的路上行驶成本、充电等待成本。充电站投入和运营管理成本又会以充电电价的形式转变为电动汽车充电者的购电成本。因此本文将$[0,T]$时段内，充电公司和充电者总成本最小化作为目标函数，设充电站的布局 S 与规模 g_s 为决策变量，如下式所示：

$$\min_{S,g_s} Z=K+C \tag{9}$$

$$C=\sum_{r\in N}\int_0^T f_{p,rs}(t)C_{p,rs}(t)\mathrm{d}t \qquad p\in P_{rs} \tag{10}$$

式中：C 为充电者总成本函数；$f_{p,rs}(t)$为 t 时刻由 r 点出发到 s 点充电的电动汽车选择走路径 p 的数量。

2.4 动态网络约束

2.4.1 时间窗约束

时间窗约束为：

$$\tau_s+\tau_{p,rs}\leqslant\tau \tag{11}$$

即电动汽车充电者从出发到充电完毕总耗时不超过 τ。

2.4.2 电动汽车流量守恒约束

电动汽车流量守恒约束为：

$$e_s(t)=\sum_{r,s,p}f_{p,rs}(t-\tau_{p,rs}(t)) \tag{12}$$

$$u_s(t)=\begin{cases} e_s(t-\tau_s) & e_s(t-\tau_s)<g_s-x_{s,s}(t-\tau_s) \\ g_s-x_{s,s}(t-\tau_s) & \\ & e_s(t-\tau_s)\geqslant g_s-x_{s,s}(t-\tau_s)>0 \\ g_s & e_s(t-\tau_s)>0>g_s-x_{s,s}(t-\tau_s) \end{cases} \tag{13}$$

式中：$f_{p,rs}(t-\tau_{p,rs}(t))$为 $t-\tau_{p,rs}(t)$时刻由 r 点出发到 s 点充电的电动汽车选择走路径 p 的数量；$e_s(t)$为 t 时刻到达 s 点的待充电电动汽车数量；$u_s(t)$为 t 时刻完成充电离开充电站的电动汽车数量。

式(12)描述了不同时刻到达 s 点充电的电动汽车数量与在此之前从不同电动汽车聚集区（r 点）出发量间的关系。式(13)描述充电站内不同排队状态下，电动汽车完成充电的离站情况。

2.4.3 流量传播约束

流量传播约束为：

$$\frac{\mathrm{d}x_{s,s}(t)}{\mathrm{d}t}=e_s(t)-u_s(t) \qquad s\in S \tag{14}$$

式(14)描述了充电队列的动态变化情况。

3 两阶段启发式算法

上述内容分析了电动汽车充电站布局及规模对充电公司及电动汽车充电站成本方面的影响。合理的充电站布局可以使充电公司和充电者的总成本最小化。对于充电站的最佳布局与规模的确定问题，本文采用两阶段启发式算法进行求解。首先确定目标充电站的建设区域（S 集），进而依据该区域所在位置及交通网络条件确定出合理的充电站规模。其求解步骤如下。

步骤 1：参数设定，即设定各地点不同时段的充电需求、各路段不同时段的阻抗系数、各地点充电站建设的投入成本等。

步骤 2：搜寻电动汽车到哪一地区的平均路上行驶成本最低，并进行排序，$\{s_1, s_2, \cdots, s_n\}$。

步骤 3：检验是否所有点到达 s_1 点用时 $\tau - \tau_p < v/\eta$，τ_p 为最小全体车辆平均路上驾驶时间，若无，停止搜索转至步骤 5，若有，则转到步骤 4。

步骤 4：搜索另一点使 s_1，s_2 组合满足平均最小路上用时成本，重复步骤 3 在最少可行集内确定极小投入成本点。

步骤 5：搜索在其他各点增设充电站时的时间节约成本相对于充电站投资成本增长之和最小的候选点。

步骤 6：若其和小于 0，则将该地点设定为充电地点且对步骤 5 进行循环。若节约成本大于 0，则停止搜索，此时的候选点和充电站规模为最佳规模。

上述求解步骤中，步骤 1～4 为第 1 阶段：确定充电站地址；步骤 5～6 为第 2 阶段：确定最佳充电站规模。

本文假设区域内电动汽车的充电行为是已知条件，现实生活中这方面数据获取难度较大。未来电动汽车普及后可采用问卷调查的方法来统计分析电动汽车拥有者的充电行为[11]，或采用更加先进的手段进行统计[12]。

4　算例分析

考虑如图 2 所示的简单网络。

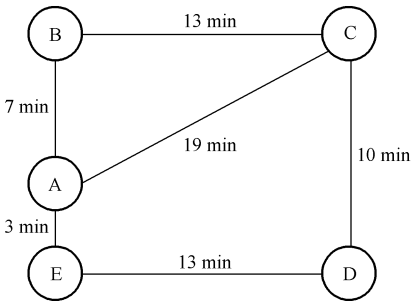

图 2　网络示意图
Fig. 2　Network diagram

设定 A，B，C，D，E 为 5 个具有不同电力基础条件、电动汽车保有量和不同道路连接状况的地点。不同地点间由于道路车辆承载能力、车流状况、路段长远不同使各路段的路上行驶时间有所差异，如 A 地到 C 地的路上最短用时为 19 min，若经过 B 地到达 C 地则需用时20 min。本算例假设充电者完全理性，充电时只选择用时最少的路径。假设研究对象为纯电池动力电动汽车，平均充电时间为10 min，充电者可承受最大充电用时为 20 min，即充电硬时间窗为[0，20 min]。由以上假设结合表 1 数据得表 2。

从表 2 得电动汽车由 A，B，E 点到达 C，D 两点的路上用时均超过充电者可承受的最大限度（硬时间窗）$\tau - \tau_p < v/\eta$，同样电动汽车由 C，D 两点到达 A，B，E 点的路上用时也超过充电者的最大可承受限度。故若要使未来充电站的布局满足硬时间窗约束，须在 $i \in \{A, B, E\}$，$j \in \{C, D\}$ 这 2 点中各建设 1 座充电站。对比各点充电站建成后的总投入成本后可知，将充电站位置设在 D，E 两点，分别安装 6 台和 11 台快速充电机，将能满足整个研究区域电动汽车的充电需求，且达到总成本最小。

表 1　基本数据
Tab. 1　Basic data

地点	单位投资成本/万元	总充电需求车辆/辆
A	200	4
B	300	7
C	400	3
D	250	6
E	150	5

表 2　充电高峰需求概况及充电站规模
Tab. 2　Peak demand charging profile and the scale of the charging stations

地点	到达不同地点的路上用时/min					充电站规模（充电机数量）/台	投入成本/亿元
	A	B	C	D	E		
A	0	7	19	16	3	10	0.26
B	7	0	13	23	10	11	0.41
C	19	13	0	10	22	7	0.34
D	16	23	10	0	13	6	0.18
E	3	10	22	13	0	11	0.25

5　结语

未来电动汽车的顺利推广有赖于消费者购买电动汽车后充电的便利程度，本文借鉴动态交通网络思想建立了满足不同地点电动汽车动态充电需求和充电站投资者投入成本最小化的多目标模型，并将充电者充电时间限制在一硬时间窗内，提出了一个可行的两阶段启发式算法，最后进行算例验证。结果显示电动汽车充电站的布局受不同待选地点电动汽车充电需求量和充电者时间约束影响较大，充电站规模主要与高峰充电需求时刻电动汽车的数量、分布以及到充电站的用时有关。

参考文献

[1] 康继光，卫振林，程丹明，等. 电动汽车充电模式与充电站建设研究[J]. 电力需求侧管理，2009，11(5)：64-66.

KANG Jiguang, WEI Zhenlin, CHENG Danming, et al. Research on electric vehicle charging mode and charging stations construction[J]. Power Demand Side Management, 2009, 11(5): 64-66.

[2] ZHEN Huajiang, ROGER A. Design and testing of a fuel-cell powered battery charging station[J]. Journal of Power Sources, 2003, 115(2): 279-287.

[3] 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.
XU Fan, YU Guoqin, GU Linfeng, et al. Tentative analysis of layout of electrical vehicle charging stations[J]. East China Electric Power, 2009, 37(10): 1678-1682.

[4] MEHDI E A, KENT C, JASON S. Rapid charge electric vehicle stations[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1883-1887.

[5] FRIESZ T L, PEETA S, BERNSTEIN D H. Multi-layer infrastructure networks and capital budgeting[R]. Fairfax, USA: George Mason University; Purdue, USA Purdue University, 2001.

[6] 滕耘,胡天军,卫振林.电动汽车充电电价定价分析[J].交通运输系统工程与信息,2008,8(3):126-130.
TENG Yun, HU Tianjun, WEI Zhenlin. Analysis on charge price of electric vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 8(3): 126-130.

[7] 尚华艳,黄海军,高自友.可变信息标志诱导下的路径选择行为[J].系统工程理论与实践,2009,29(7):166-172.
SHANG Huayan, HUANG Haijun, GAO Ziyou. Route choice behavior under guidance of variable message signs[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2009, 29(7): 166-172.

[8] 陈星光,周晶,李卓君,等.多维动态用户最优出行选择的变分不等式模型[J].管理工程学报,2009,23(1):23-28.
CHEN Xingguang, ZHOU Jing, LI Zhuojun, et al. A variational inequality model for optimal travel choices with multidimensional DUO[J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2009, 23(1): 23-28.

[9] 深圳市发展与改革委员会. SZDB/Z29—2010 深圳市电动汽车充电系统技术规范[S].深圳:深圳市市场监督管理局,2010.

[10] 王成山,王赛一.基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网络规划[J].电网技术,2004,28(14):68-73.
WANG Chengshan, WANG Saiyi. Urban medium-voltage distribution network planning based on spatial GIS and tabu search[J]. Power System Technology, 2004, 28(14): 68-73.

[11] US Department of Transportation. Highlights of the 2001 national household travel survey (NHTS) [EB/OL]. [2010-07-24]. http://www.bts.gov/publications/highlights_of_the_2001_national_household_travel_survey/pdf/entire.pdf.

[12] National Renewable Energy Laboratory(NREL). Using GPS travel data to assess the real world driving energy use of plug-in hybrid electric vehicles [EB/OL]. [2010-05-31]. http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/41410.pdf.

任玉珑(1944—),女,教授,博士生导师,主要研究方向:电力技术经济分析、电力规划、电力市场。

史乐峰(1982—),男,通信作者,博士研究生,主要研究方向:电力技术经济。E-mail: shilefeng@cqu.edu.cn

张 谦(1980—),女,博士,讲师,硕士生导师,主要研究方向:电力市场与电力系统安全经济运行。

Optimal Distribution and Scale of Charging Stations for Electric Vehicles

REN Yulong[1], *SHI Lefeng*[1], *ZHANG Qian*[2], *HAN Weijian*[1], *HUANG Shoujun*[1]

(1. School of Economics and Business Administration, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To provide the theoretical support and ideas for charging station construction, a dynamic traffic network method is used to build a multi-objective optimization model with a hard time window constrains to obtain the optimal distribution and scale of electric vehicles' charging stations. In this model, the minimum of capital cost and charging cost is treated as the optimization objective, and a two-phase heuristic algorithm is proposed to solve this model. Finally, case studies on a simple example verify the correctness and effectiveness of the proposed model.

This work is supported by Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (No. 2007DA10512710501), and Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (No. CDJRC10150002, No. CDJXS11020003).

Key words: electric vehicle; dynamic traffic flow; charging station; layout; scale