

# 考虑电动汽车的车-站-路-网多主体联合优化

游 阳, 荆朝霞

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 随着电动汽车数量的增长, 电动汽车及其相关产业都涌现出各类实际问题。应用复杂适应性系统理论对电动汽车及其环境这一复杂系统进行建模, 并提出增加各主体间的信息流的优化方案对整个系统进行了优化, 并用一个简单算例证明了该方案的有效性。

**关键词:** 电动汽车; 复杂适应性系统; 多主体优化

## Vehicle-station-road-network multi-agent joint optimization considering electric vehicles

YOU Yang, JING Zhaoxia

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the number of electric vehicles increasing, all kinds of practical problems have emerged in electric vehicles and related industries. In this paper, the theory of complex adaptive system is applied to model the complex system of electric vehicle and its environment, an optimization scheme to increase the information flow between the main bodies is proposed to optimize the whole system, and a simple example is given to illustrate the effectiveness of the scheme.

**Key words:** electric vehicles; complex adaptive system; multi-agent optimization

## 0 引言

在全球变暖、能源紧张、环保需求、科技进步等背景下, 电动汽车被各国各地政府和企业推上了舞台<sup>[1]</sup>, 成为汽车历史发展过程中的必然, 也成为交通电气化发展的重要一环。在各国各地政府的研发资助等大力支持和政策补助等推广下, 电动汽车相关技术不断提高, 电动汽车的续航里程和充电市场等用户感到焦虑的问题逐步得到有效改善。可以预见在不久的将来, 电动汽车将越来越被人们所接受和使用, 成为主要的交通工具之一。随着电动汽车数量的不断增长, 越来越多相关的用户使用问题、交通问题以及充电站、电网的投资运营问题都涌现出来。

1) 用户使用问题。用户的使用问题主要是充电难的问题。充电难的问题来自两个方面: (1) 充电设施问题和充电服务问题, 充电设施问题具体是充电设施的建设速度跟不上电动汽车的增长速度, 充电设施建设缺乏统一规划, 设施分布不合理; (2) 充电服务问题具体有充电设施信息不集中, 不便于用户获知充电设施位置, 缺乏充电引导服务, 用户无法选择最节省时间和成本的充电站充电。

2) 充电站运营问题。充电站的运营主要有运营

模式和运营策略两方面的问题。运营模式方面, 充电设备市场需求大, 成为投资热点, 同时准入门槛较低, 导致市场过于分散、混乱、小规模经营, 同时充电设施运营商靠收取固定充电服务费盈利, 盈利方式过于单一。运营策略方面, 运营商服务过于单一, 缺乏吸引客户的亮点, 如制定不同的充电套餐; 每个运营商仅有小部分充电站信息(属本公司运营), 缺乏更多的充电站和用户信息, 无法做出实时优化或数据分析来进行长期规划。

3) 交通问题。交通问题主要有运行和规划两个方面。交通运行方面, 交通运行信息与充电站运行信息隔绝, 交通流量和充电站运营可能互相产生不良影响; 交通规划方面, 交通规划与充电站规划割裂, 导致一系列问题(充电站位置若位于主要干道, 易造成交通堵塞, 交通不通畅, 导致充电站无人问津)。

4) 电网问题。电网问题主要有运行和规划两个方面。电网运行方面, 缺乏调控充电站内电动汽车负荷的具体方法; 电网规划方面, 电网规划与充电站规划割裂, 如充电站规划需要完全迁就电网网架, 导致一系列问题。

随着电动汽车数量的增长, 未来可能会出现更多还未预测到的问题。而上述这些问题以及未来未

知的问题,如果得不到及时和妥善的解决,将会对整个电动汽车及其相关产业的发展产生负面影响。

电动汽车及其行动环境是一个包含多个主体,多种利益相互耦合的复杂系统,因此对其中任何一个问题的建模、研究以及解决方法的提出,都不能片面地对待,不能将某个问题与其他问题分割来看,也不能将某个主体与其他主体分割来看。

因此对电动汽车及包含充电站、电网、交通等电动汽车运行环境的整个复杂系统的建模和仿真是十分关键和有意义的基础环节,从一个完整系统的角度,对系统中出现的用户充电难、充电站运营及交通、电网的运行规划问题提出了解决方案,协调优化电动汽车、充电站、交通、电网多个主体,进一步推动电动汽车及其相关产业的发展。

本文首先对电动汽车及其相关产业现存的问题进行了总结。接着对相关的研究现状尤其是目前研究中存在的问题作了总结,针对这些问题,提出采用复杂适应性系统理论来研究电动汽车及其环境的优化问题。提出加强各主体间信息流的传递对整个系统进行优化,并用一个简单算例证明了该方案的有效性。

## 1 相关研究现状

电动汽车充电负荷建模是研究电动汽车相关问题的基础,电动汽车有序充放电调控策略是优化电动汽车用户使用以及优化电动汽车所在环境的主要手段。下面对电动汽车充电负荷建模和电动汽车有序充放电调控策略这两方面的研究现状进行总结分析。

### 1.1 电动汽车充电负荷建模研究现状

当大量的电动汽车投入运行后,电动汽车的负荷特性,无论对电网运营方还是充电服务设施运营方,都是关注的焦点。电动汽车充电负荷模型研究是几乎所有电动汽车相关研究(包括电动汽车对电网影响研究、充电站规划研究、电网对电动汽车的利用研究等)的基础。电动汽车的充电负荷预测研究有两个关键性问题:一是影响电动汽车充电负荷的因素的分析和选择;二是具体建模方法的选择。

影响电动汽车负荷的主要因素有电动汽车充电方式、电动汽车电能消耗情况、电动汽车类型和电动汽车行驶习惯。主要的建模方法有状态方程法<sup>[2-3]</sup>、概率分析法<sup>[4-9]</sup>和动态仿真法<sup>[10-16]</sup>。

负荷建模研究主要仍存在以下问题。

1) 各影响因素间耦合关系需加强分析,探索更接近实际的模型。由于电网、充电设施、电动汽车和用户行为之间复杂的耦合特性和相互作用机制,

电动汽车负荷实际存在很大的不确定性。目前缺乏综合各种关键因素、耦合特性和相互作用机理的多源数据融合技术与相关性方面的电动汽车充电需求分析模型。

2) 充电行为中的不确定性问题还需进一步研究。目前大多数的相关研究中的充电负荷模型都需要对用户行为规律进行一定的假设,而实际问题中用户的出行和决策都具有较大的不确定性。因此对于用户行为的不确定性问题的研究还需在负荷模型中进一步刻画。

3) 充电负荷空间分布特性需进一步探究。目前研究侧重于电动汽车充电负荷的时间分布特性,对负荷的空间特性分析,现有的研究方法有基于出行链马尔科夫过程的蒙特卡洛仿真方法、基于 OD 矩阵和基于多代理系统的建模方法。但目前还不完善有待进一步研究,研究时应充分考虑在时间、空间和行为三维不确定性约束下电力系统、交通网络系统和电动汽车的协同预测与分析。

4) 参与放电的能力预测及评估研究需拓展延伸。电动汽车是兼具可延迟/可中断负载/可放电的一种需求侧资源,现有研究绝大多数侧重于电动汽车充电负荷的预测分析,随着技术进步和发展,未来电动汽车向电网放电将成为一种可行的模式,放电功率预测的研究有待开展。

### 1.2 电动汽车有序充放电调控策略研究

从调控优化目标角度来看,按优化目标数量不同可将有序充放电调控研究分为单目标优化和多目标优化;根据优化目标性能的不同,主要分为以保持电网安全稳定运行为目标的调控策略、以提高经济性为目标的调控策略及兼顾安全性和经济性的综合目标等。其中以经济性为目标的调度策略,根据研究对象的不同可以分为:考虑电动汽车用户利益的调度策略<sup>[17-22]</sup>、考虑电动汽车调度中心利益的调度策略<sup>[23-25]</sup>以及考虑电网运营商利益的调度策略<sup>[26-27]</sup>。

1) 现有调控策略当中,部分研究是在电动汽车直接可控的情形下开展的,实际应用的前提是需要跟电动汽车用户签订相关协议,以约束车辆参与调控。针对采取电价或政策激励措施引导有序充放电的策略,对于电动汽车是否会按设定的模式参与调控还值得商榷,电动汽车参与充放电调控的模糊性、不确定性因素应当被充分考虑。

2) 在制定优化充放电策略时,不管是日前、日内还是实时调度决策,目标通常都被事先固定,不能根据实际情况调整优化目标和约束,但实际上由于环境的变化,需要优化的目标应当具有动态调整性能。

3) 针对优化目标, 往往只从安全性或经济性的角度考虑电网、代理商、车辆用户等几方面的指标, 但电动汽车具有可移动性、动态随机性等特征, 其与电网、路网、交通等各系统均存在复杂交互关系, 目前能够统筹各系统效益的充放电调控策略很少。

## 2 复杂适应性建模与仿真思想

复杂系统是对一个系统而言的概念, 可描述为系统拥有大量个体, 个体间存在交互, 其内部关系复杂。对复杂系统而言, 传统的建模方法(如还原论方法、归纳推理方法等)不能很好地进行刻画, 需要采用新的建模理论与仿真方法。复杂适应性系统理论是研究复杂系统、解决复杂问题的一个基础研究思想。

复杂适应性系统(Complex Adaptive System, CAS)理论的主要内容概括如下。

(1) 系统由大量主体构成, 主体具有主动性和目的性。

(2) 主体与主体、主体与环境之间的相互作用, 是系统进化的主要动力。

(3) 主体行为的进化通过引入随机因素, 使随机因素成为影响系统演化的重要力量。

(4) 系统的自组织和涌现。

复杂性是电动汽车及其环境系统一个重要的基本特征。电动汽车及其环境系统的复杂性表现在以下几个方面。

1) 关于电动汽车的研究涉及多种主体, 如电网、充电站运营商、电动汽车运营商、电动汽车使用者等。

2) 各个主体有各自不同的目标、行为和决策, 如电网的目标是电网系统的安全经济运行, 充电站运营商的目标是降低运营成本、满足使用者的需求等。

3) 各个主体会根据不同情况改变各自的行为, 如电动汽车使用者在选择充电站充电时会综合考虑充电时间、等待时间、距离等多种因素, 在不同的情形下做出不同的选择。

4) 各个主体的行为策略不是一成不变而是动态的, 即各个主体是有学习能力的, 如电动汽车使用者如果多次在同一时刻进入同一充电站后发现每次都需要花费很长的等待时间, 那么该使用者将不会再于同一时刻进入该充电站。

5) 电动汽车行为具有时空性。

电动汽车相关研究中通常需要建立相应的模型。

从以上的分析可知, 电动汽车及其环境系统的

复杂性, 使得应用传统研究方法进行研究会出现第2节中问题。而应用CAS理论对电动汽车及其环境系统进行研究, 可以很好地避免这些问题的出现。

从CAS建模的角度, 将电动汽车及其环境系统中的各类实体进行分类并识别它们之间的交互关系。将系统中实体划分为如下几类。

(1) 用车实体。系统内存在大量用车实体, 主要有电动私家车用车实体、电动公交车用车实体、电动出租车用车实体以及电动物流车用车实体等。各个用车实体的特性各不相同, 如电动出租车行为的随机性最强, 车主的趋利性更强等。

(2) 行驶环境实体。交通实体是主要的行驶环境主体, 为电动汽车提供行驶环境。交通实体与用车实体会互相影响。

(3) 充电环境实体。充电环境实体包括充电站实体和电网实体。充电站实体为用车实体提供集中的充电环境, 与用车实体互相影响。电网实体为用车实体提供电能, 也与用车实体互相影响。

## 3 车-站-路-网多主体联合优化

在电动汽车及其环境的复杂系统中, 包含多个主体, 各主体有各自不同的目标, 各个目标之间可能会有利益冲突, 这是进行多主体联合优化的主要难点所在。通过对实际问题的分析可知, 电动汽车及其相关产业目前出现的电动汽车使用、充电站运营等问题, 并不完全由多个主体利益冲突产生, 相反, 某些主体间存在着利益一致的部分, 比如电动汽车车主希望行驶时间短, 交通实体的目标是交通通畅, 二者的目标本质是一致的。所以本文通过关键信息加强各主体的交互进一步研究多个主体优化问题, 主要的思路如下。

1) 集中电动汽车、充电站、道路、电网的实时信息。当车需要充电时, 为其提供实时道路、充电站(排队数、实时充电电价)信息, 同时为充电站提供车、路、网信息。

2) 基于路、站信息的电动汽车充电引导策略。具体为电动汽车提供每个充电站的充电电价、站内排队车辆数以及车一站之间的距离。主要的优化目标是电动汽车进行充电的时间成本最小。

3) 基于车、站信息的充电站实时电价决策策略。具体应用充电站设备利用率和充电站附近路况信息优化充电站的盈利。

本文主要对电动出租车实体、充电站实体、电网实体、道路实体进行了建模, 并对本文提出的优化策略进行了仿真验证, 以下是仿真结果。

表 1 电动出租车运营数据比较

Table 1 Comparison of the electric taxi operation data

电动出租车运营数据比较		无优化	有优化
充电前行驶距离/km	平均值	7.75	8.38
	上限	15.59	14.80
	下限	3.94	4.55
	标准偏差	2.04	2.33
排队时间/(min/次)	平均值	11.17	4.13
	上限	14.00	6.00
	下限	7.00	2.00
	标准偏差	1.94	1.47
载客日收入/元	平均值	1 287.73	1 296.07
	上限	1 526.77	1 561.36
	下限	1 047.74	1 081.55
	标准偏差	123.69	102.15
充电总成本/(元/次)	平均值	18.418	16.369

从电动出租车的充电前行驶距离、排队时间、载客日收入和充电总成本四个方面对无优化和有优化两种情况进行比较，由表 1 可以知。

1) 两种情况下，电动出租车的充电前行驶距离相差不大，无优化情况的平均充电前行驶距离和最大充电前行驶距离都比优化情况下的平均和最大值稍小，原因主要是无优化情况下电动出租车选择充电站时只考虑了距离因素。

2) 电动出租车应用充电决策方法后，出租车的充电排队时间大大地降低，优化情况相比无优化情况节省了 63% 的时间。

3) 电动出租车应用优化方法后，日载客收入有小幅度的提高，原因可能是应用充电决策方法节省了充电总时间，从而使载客时间增加，收入增加。

4) 电动出租车应用优化方法后，充电总成本有一定程度的降低，原因主要是无优化情况下电动出租车选择充电站时仅考虑距离因素，考虑时间成本这一主要影响因素，无优化情况下的值明显高于优化情况。

综上所述，电动出租车在应用优化方法后，电动出租车的等待时间和充电总成本降低，载客收入增加，运营利润得到了提高。

由表 2 可知，相对无优化情况，优化情况下 106 号、107 号、108 号充电站的负荷波动率都得到不同程度的降低。相对于应用峰谷平电价的情况，应用电价决策方法情况下，每个充电站的日收入都有不同程度的增加。

如表 3 所示，优化后 IEEE33 节点配电网系统中一天的总网损为 6 437.86 kWh；无优化时的网损为 7 488.19 kWh，比优化时总的网损增加了 14.03%。

优化时，在 22:00 时 IEEE33 配电网系统中的 18 号节点出现最大电压偏移-13.05%；无优化时，在 10:00 时 IEEE33 配电网系统中的 18 号节点出现最大电压偏移-13.57%，此时 16 号节点和 17 号节点都超过-13.05%。

表 2 充电站运营数据比较

Table 2 Comparison of the charging station operation data

充电站运营数据比较	无优化	有优化	
负荷波动率	105 号	47.54%	48.43%
	106 号	59.14%	54.04%
	107 号	62.93%	48.53%
	108 号	83.63%	71.88%
充电站日收入	105 号	2 919.35	3 146.99
	106 号	2 691.35	3 022.39
	107 号	1 973.22	2 075.42
	108 号	859.33	1 240.72

表 3 在充电引导和无充电引导策略下的网损和最大电压偏移

Table 3 Network loss and the maximum voltage offset

with and without charging guiding strategy

电网参数	有优化	无优化
网损/kWh	6 437.86	7 488.19
最大电压偏移	-13.05%	-13.57%

另外，优化情况下充电高峰时段的道路平均车速也比无优化情况下的车速高 9.4%。

综上所述，本文提出的优化方案对电动出租车、充电站、电网和交通的运行运营都有一定程度的优化。

#### 4 总结

本文从电动汽车及其相关产业的实际问题出发，对相关研究作了分析和总结，根据目前研究中存在的问题，提出应用复杂适应性系统理论对电动汽车及其环境系统进行建模和研究。应用复杂适应性系统理论对电动汽车及其相关主体进行简单分析，并提出从加强各主体间关键信息交互的角度出发，来研究多个主体的优化问题，并用实际的仿真算例证明了该优化方案的有效性。

#### 参考文献

[1] DOUCETTE R T, MCCULLOCH M D. Modeling the prospects of plug-in hybrid electric vehicles to reduce CO emissions[J]. Applied Energy, 2011, 88(7): 2315-2323.

[2] YI Zonggen, BAUER P H. Spatio-temporal energy demand models for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015: 1-6.

- [3] BAE S, KWASINSKI A. Spatial and temporal model of electric vehicle charging demand[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 394-403.
- [4] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 36-42.  
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Study on plug-in electric vehicles charging load calculating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [5] 徐浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 计及多日一充模式的规模化电动汽车充电负荷建模策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 129-137.  
XU Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. A modeling strategy for charging loads of large-scale electric vehicles considering multi-days spaced charging mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 129-137.
- [6] DARABI Z, FERDOWSI M. Extracting probability distribution functions applicable for PHEVs charging load profile[C] // Transmission & Distribution Conference & Exposition, May 7-10, 2012, Orlando, FL, USA: 1-6.
- [7] GETH F, WILLEKENS K, CLEMENT K, et al. Impact-analysis of the charging of plug-in hybrid vehicles on the production park in Belgium[C] // Melecon 2010-2010, IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. IEEE, 2010: 425-430.
- [8] TAYLOR J, MAITRA A, ALEXANDER M, et al. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicle loading on distribution system operations[J]. 2009: 1-6.
- [9] 王满商, 李正明, 汪洋. 考虑电动汽车不确定性因素的配电网分布式电源优化布置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 67-72.  
WANG Manshang, LI Zhengming, WANG Yang. Distribution network distributed power supply configuration considering the uncertainties of electric vehicle[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 67-72.
- [10] WOLFSON R P, GOWER J H. The role of computer modeling and simulation in electric and hybrid vehicle research and development[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1983, 32(1): 62-73.
- [11] HOU J, GUO X. Modeling and simulation of hybrid electric vehicles using HEVSIM and ADVISOR[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008: VPPC '08, IEEE, 2008: 1-5.
- [12] KROEZE R C, KREIN P T. Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations[C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2008: 1336-1342.
- [13] LEVESQUE M, XU D Q, JOOS G, et al. Co-simulation of PEV coordination schemes over a FiWi smart grid communications infrastructure[C] // IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2012: 2901-2906.
- [14] LEWANDOWSKI C, SCHMUTZLER J, WIETFELD C. A simulation environment for electric vehicle charging infrastructures and load coordination[J]. Gi Jahrestagung, 2010: 479-484.
- [15] YEH Y C, MEYER G G, MEYER-ZHAO Z, et al. Simulation and evaluation of charging control systems for electric vehicle car parks[C] // Powertech, 2013: 1-6.
- [16] 钱甜甜, 李亚平, 郭晓蕊, 等. 基于时空活动模型的电动汽车充电功率计算和需求响应潜力评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 127-134.  
QIAN Tiantian, LI Yaping, GUO Xiaorui, et al. Calculation of electric vehicle charging power and evaluation of demand response potential based on spatial and temporal activity model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 127-134.
- [17] MOJDEHI M N, GHOSH P. IEEE 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring) - Glasgow, United Kingdom (2015.5.11-2015.5.14) 2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring) - Estimation of the Battery Degradation Effects on the EV Operating Cost during Charging/Discharging and Providing Reactive Power Service[J]. 2015: 1-5.
- [18] NAKAMURA Y, MITSUKURI Y, IGUCHI M, et al. Study of economic system at compensation for voltage drop utilizing charging power adjustment of electric vehicles[C] // Power & Energy Engineering Conference, IEEE: 2015.
- [19] MOJDEHI M N, GHOSH P. Minimization of energy usage and cost for EV during reactive power service[C] // IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering, 2015.
- [20] MOJDEHI M N, GHOSH P. An on-demand compensation function for an EV as a reactive power service provider[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4572-4583.
- [21] ZOU N, QIAN L, LI H. Auxiliary frequency and voltage regulation in microgrid via intelligent electric vehicle charging[C] // IEEE International Conference on Smart Grid Communications, IEEE: 2015.
- [22] 周天沛, 孙伟. 基于充电设备利用率的电动汽车充电路径多目标优化调度[J/OL]. 电力系统保护与控制

- 制:1-9[2019-02-25].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1401.TM.20190219.1513.006.html>.
- ZHOU Tianpei, SUN Wei. Multi-objective optimal scheduling of electric vehicles for charging route based on utilization rate of charging device[J]. Power System Protection and Control: 1-9[2019-02-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1401.TM.20190219.1513.006.html>.
- [23] CARRADORE L, TURRI R. Electric vehicles participation in distribution network voltage regulation[C] // Universities Power Engineering Conference, IEEE, 2010.
- [24] 王岱, 管晓宏, 吴江, 等. 基于车辆行驶行为特性建模的电动汽车充放电策略与分析[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2322-2327.
- WANG Dai, GUAN Xiaohong, WU Jiang, et al. Vehicle driving pattern based modeling and analysis of centralized charging/discharging strategy for plug-in electric vehicles[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2322-2327.
- [25] WU X, LI L, ZOU J, et al. EV-based voltage regulation in line distribution grid[C] // Instrumentation & Measurement Technology Conference, IEEE, 2016.
- [26] JIANG B, FEI Y. Decentralized scheduling of PEV on-street parking and charging for smart grid reactive power compensation[C] // Innovative Smart Grid Technologies, IEEE, 2013.
- [27] KHORRAMDEL B, KHORRAMDEL H, AGHAEI J, et al. Voltage security considerations in optimal operation of BEVs/PHEVs integrated microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1575-1587.
- 
- 收稿日期: 2018-10-31
- 作者简介:
- 荆朝霞(1975—), 女, 通信作者, 教授, 研究方向为电力市场、电力系统优化规划和运行、电动汽车与智能电网; E-mail: zxjing@scut.edu.cn
- 游阳(1995—), 女, 博士研究生, 研究方向为电动汽车、电力市场。E-mail: you.yang@mail.scut.edu.cn