

# 电动汽车参与电力需求响应的成本效益分析 ——以上海市为例

刘坚<sup>1</sup>, 熊英<sup>2</sup>, 金亨美<sup>3</sup>, 张永伟<sup>4\*</sup>

(1. 中国宏观经济研究院能源研究所, 北京市 西城区 100038;

2. 北京车百会新能源汽车科技发展研究院, 北京市 海淀区 100096; 3. 自然资源保护协会, 北京市 朝阳区 100026;

4. 清华大学公共管理学院, 北京市 海淀区 100084)

## Economic Assessment of Demand Response Delivered by Electric Vehicles in Shanghai

LIU Jian<sup>1</sup>, XIONG Ying<sup>2</sup>, KIM Hyoung Mi<sup>3</sup>, ZHANG Yongwei<sup>4\*</sup>

(1. Energy Research Institute, Chinese Academy of Macro-economics Research, Xicheng District, Beijing 100038, China;

2. Beijing EV100 New Energy Vehicle Technology Development Institute, Haidian District, Beijing 100096, China;

3. Natural Resources Defense Council, Chaoyang District, Beijing 100026, China;

4. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the high adoption of electric vehicles (EVs), their participation in the demand response is increasingly important. Although EVs are likely to provide cost-efficient flexibility to the power system, the current research on EV demand response mainly focuses on strategies for EV aggregation and charging optimization. In contrast, the studies on the technical and economic performance of EV demand response based on actual case studies have been limited. Therefore, a comparison study was conducted of EV demand response in three charging locations: residential private charging, dedicated work place charging, and battery swap stations. This showed that EVs have a relatively high response rate when participating in the demand response via dedicated work place charging, while the application potential and economy of the EV demand response delivered by battery swap stations were highly uncertain as a result of the variation in battery swap activities. It was also observed that EVs still face policy barriers to participating in demand response programs, and market mechanism innovations are required to address such challenges.

**Keywords:** electric vehicles; demand response; battery swap; economic assessment

**摘要:** 随着电动汽车数量的不断增加, 电动汽车参与电力需求响应的重要性也日益显现。相比其他需求侧灵活性资源, 电动汽车有望提供灵活度更高且成本更低的需求响应, 但现有研究主要集中在聚合方式、优化策略等理论层面, 结

合具体案例分析实际效果和经济性水平的研究相对有限。因此, 结合上海市试点实际情况, 围绕住宅私人充电桩、办公地点专用充电桩、换电站等3类充换电场所, 对比分析了当前电动汽车参与削峰、填谷两类需求响应的运行效果和经济性差异。案例显示电动汽车在专用充电桩的响应率较高, 其提供响应的规模潜力也较大, 而换电站参与需求响应的效果因换电强度的变化存在较高不确定性。研究还发现当前电动汽车参与需求响应存在一定政策障碍, 未来引导大规模电动汽车参与电网互动仍需市场规则与机制创新。

**关键词:** 电动汽车; 需求响应; 换电; 经济性评估

## 0 引言

电动汽车可作为高度灵活的充放电资源, 在调节电力负荷、消纳可再生能源、改善供电质量等方面具有巨大应用潜力。中国是全球最大的电动汽车市场, 在电动汽车与电网互动领域具有得天独厚的条件。当前相关研究一般基于多种电动汽车渗透率, 从负荷、电网损耗和电压等几个方面分析电动汽车充电对配电网的影响<sup>[1-3]</sup>, 并根据负荷变化, 提出电动汽车智能充电策略<sup>[4-5]</sup>, 从而达到平稳负荷、消纳新能源、降低电能损耗和提高电压质量等目标<sup>[6-8]</sup>。然而现有电动汽车参与电力需求响应的研究主要集中在聚合方式、优化策略等理论层面, 结合具体案例分析实际效果和经济

性水平的研究相对有限。考虑到近年来国内多个城市在开展电力需求响应的同时，尝试将电动汽车纳入试点，在车网互动方面做出了积极探索，基于实际试点项目论证电动汽车系统灵活性价值的重要性日益突出。

作为重要的负荷侧新型灵活性资源，电动汽车正在通过目录电价峰谷价差、电力需求响应、调峰辅助服务等不同模式参与电力系统运行。在各需求响应试点城市中，上海市的车网互动工作具有重要示范意义。一方面上海市电动汽车保有量位居全国前列，交直流及充换电模式种类多样，另一方面上海市在2014年成为国家发展改革委指定的首个需求响应试点城市，并在2019年开始电动汽车参与需求响应的试点工作以探索可持续商业模式。

以往车网互动经济性分析大多从电动汽车车队整体角度展开<sup>[9-11]</sup>，本研究根据上海市实际试点情况，着重针对私人充电桩、专用充电桩以及换电站参与需求响应的效果进行对比，分析车辆在不同充换电场所提供的灵活性调节效果及经济性。此外，本研究还评估了电动汽车参与电力系统多重应用的商业化前景，相关研究成果可对后续负荷侧资源参与电力市场的政策设计提供参考。结合国内已有实践，提出了规范电动汽车参与电网互动的市场准入、完善车网互动的市场机制、加快推进车网互动能力建设等推动后续电动汽车参与需求响应工作的政策建议。

## 1 上海市电动汽车推广及需求响应开展情况

截至2019年底，上海市新能源汽车累计推广已经达30万辆，实际保有量26万辆左右。当前上海市充电桩数量超过28万个，位居全国第一，车桩配比接近1:1，其中私人充电桩19万个，公共桩和专用桩分别为5万和4万个。随着数量规模不断提升，电动汽车充电负荷给电网带来的压力也日益加大，主要包括：①电动汽车充电导致负荷增长，特别是大量电动汽车集中在负荷高峰期充电，将加剧电网负荷峰谷差，加重电力系统运行负担；②由于电动汽车用户用车行为和充电时空分布存在不确定性，电动汽车充电负荷具有较大的随机性，电网优化控制的难度不断提升；③电动汽车充电负荷属于非线性负荷，充电设备中的电力电子装置将产生谐波，引起电能质量问题；④大量电动汽车充电将改变电网，尤其是配电网负荷结构和特性，传统的电网规划方法可能无法适用于电动汽车大规模接入的情况。特别是考虑到上海市电动汽车保有

量位居全国前列，公交、公务、环卫和物流等领域电动汽车充电需求各异，交直流及充换电模式种类多样，加之上海市外来电力占比高，本地电网调峰压力大，大量电动汽车充电对上海电网的影响不容忽视。

原有的负荷管理工作依托电力需求响应平台开展，只能监测到参与的楼宇、厂家等客户的响应负荷情况，而无法监测到具体设备的负荷变化，负荷管理工作的颗粒度较粗。2019年4月，上海市经济信息化委员会反馈国网上海市电力公司《关于同意开展上海市综合需求响应试点工作的批复》，提出深入研究特大型城市受端电网泛在电力物联网应用场景，积极探索充电桩等新技术应用示范，采用市场化手段柔性调节负荷。2019年10月，国家电网有限公司将国网上海和冀北电力列为首批虚拟电厂运营体系试点单位。虚拟电厂运营体系由营销、交易、调度等多个专业部门、单位联合构建，采用多专业、多层次、市场化的运营模式。该运营体系通过虚拟电厂交易平台、运营管理与监控平台等系统，深层连接和精准接入客户用能设备，实现对闲散负荷的聚合、交易和调配，达到资源聚合和协调优化的目的。自国网上海市电力公司启动虚拟电厂项目建设以来，共有500多个客户接入平台。这些客户涵盖了电动车充电桩、园区微电网、商业建筑虚拟电厂、工业自动响应、三联供储能系统、分布式能源、冰蓄冷装置等多种类型。

本研究基于上海市2019年6月7日凌晨2:00—5:00填谷试点、8月9日12:00—14:00削峰试点，以及12月5日9:00—11:00削峰试点共3次电动汽车需求响应数据，分析车网互动效果与经济性水平。

## 2 需求响应试点设计

通过需求响应，电动汽车理论上可在电力市场获得电能量、容量及辅助服务方面的价值，最终实现保障供电安全、改善供电质量、缓解电网阻塞、延缓电力投资、消纳可再生能源以及提升电力系统运行效率等多种价值（如图1所示）。目前上海市电动汽车主要通过削峰和填谷响应体现保障供电安全和消纳可再生能源两方面作用。

上海市电动汽车参与需求响应试点流程与要求如下。

1) 需求响应资源注册。所有虚拟发电资源，包括3个颗粒度——虚拟电厂总平台（所有充电桩的合计功率与电量）、接入资源（可假设为独立报桩的场

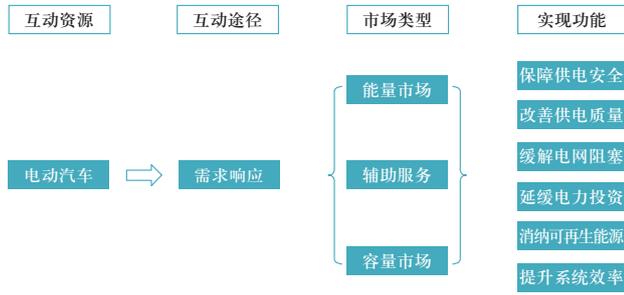


图1 电动汽车需求响应市场机制与实现功能

Fig. 1 EV demand response market mechanism and functions

站、有营销户号的对象)、以及最小颗粒度的虚拟发电机组(如充电桩)。充电运营商的平台需与虚拟电厂平台对接,通信协议是Open ADR。2019年试点时期对充电运营商采用线下邀约的方式。需求响应资源颗粒度大小没有限制,可以到站、配电柜、桩。

2) 需求响应能力预上报。除了虚拟电厂平台对接入平台做负荷预测,各个运营商平台也要具备自身负荷预测能力。充电运营商上报中远期、隔日的需求响应曲线,以考核预测曲线与实际效果。负荷基线历史数据采用以往的平均负荷曲线,一般工作日开展削峰活动,取前5个工作日的平均负荷;休息日开展填谷活动,取前2个休息日的平均负荷,以此来考核响应期间负荷的变化。2019年试点时期对充电运营商没有设置容量门槛;未单独报装的充电桩也纳入试点活动;参与响应的最短1 h。

3) 实时数据上报。充电功率、电量数据以<15 min或5 min的间隔向平台上报。2019年试点时期,非充电状态下如果没有采集功率/电量数据,运营商可以申报为0。考核不要求在线接口数据,而按照运营商直接上报的数据来核算。

4) 费用结算。用户负荷基线与实际电力负荷曲线的差值即用户的负荷削减贡献,以电费抵扣方式补偿,需要充电运营商在上海市有独立账号。2019年试点时期,即使响应量很小,也认为有效,并按照实际响应量给予补偿。

目前上海市响应量的计量模型以电力用户的关口计量为准,测算负荷基线与当天响应时段负荷的差值,最后乘以补偿系数。2019年度《需求侧响应年度交易单边竞价规则》分为削峰和填谷2个类型,按照政策规定,这2个类型都需要独立申报。其中,交易补偿价格上限(基准值)削峰响应为30元/kW,填谷响应为12元/kW。获取补贴基准值的前提是单个用户响应的次数不超过10次/a,响应时长不超过10 h/a。在

此基础上,根据通知时间提前量、单次响应量、年度响应参与度进一步计算补贴系数(表1)。补偿资金取自历年夏季季节性电价差值,以电费退补方式进行补偿,补偿对象为参与响应的终端电力用户。

2019年试点时期参与需求响应的运营商包括国网电动汽车、蔚来、星星充电、普天、依威能源、小桔充电等。这些运营商充电数据采集按照中电联的标准协议,采集周期20~30 s,数据存储周期较长,但大多数充电桩未报装。

需要指出,目前各地电力需求响应补偿政策有较大差异,且山东、江苏、浙江等省近年来已陆续开展电力需求响应市场竞价,负荷侧资源参与需求响应的价格及频次都存在较大不确定性。目前上海市电力需求响应补偿价格在各试点城市中相对偏高,且试点初期上海市对电动汽车采取固定补偿,一定程度上保障了电动汽车参与响应的经济效益。考虑到市场机制及补偿价格的不同,各地经济性评估结果可能存在较大差异。

表1 电动汽车需求响应补偿系数  
Table 1 EV demand response pricing standards

|                    | 响应比例                       | 价格调整系数       | 备注             |      |
|--------------------|----------------------------|--------------|----------------|------|
|                    | 单次响应量系数 $k_{1,i}$          | <0.6         | 0              |      |
| [0.6, 0.8)         |                            | 0.8          |                |      |
| [0.8, 1.2]         |                            | 1            | 竞价基准           |      |
| (1.2, 1.4]         |                            | 1.05         |                |      |
| >1.4               |                            | 1            | 响应量按照签约量140%计算 |      |
| 单次响应速度系数 $k_{2,i}$ | 通知时间提前量/h                  | 响应速度系数       | 响应类别           | 备注   |
|                    | >24                        | 0.8          | 约定             |      |
|                    | (8, 24]                    | 0.9          | 约定             |      |
|                    | (2, 8]                     | 1            | 约定             | 竞价基准 |
|                    | (0.5, 2]                   | 1.5          | 约定             |      |
|                    | (0, 0.5]                   | 2            | 约定             |      |
| 不通知                | 3                          | 实时           |                |      |
| 单次响应时长系数 $k_{3,i}$ | T/10 (单次需求响应活动期时长T, 精确到小时) |              |                |      |
| 年度响应参与度系数 $k_4$    | 响应时长比例                     | 价格调整系数       | 备注             |      |
|                    | (0, 0.3]                   | 0            |                |      |
|                    | (0.3, 0.8]                 | $k_{time,1}$ |                |      |
|                    | (0.8, 1]                   | 1            | 竞价基准           |      |

注: 响应比例=响应量/签约响应量

### 3 试点效果分析

从上海市电动汽车参与电力需求响应的试点结果看, 车辆在不同充换电场所提供的充电灵活性调节规模各异, 实现的响应效果也存在较大差别。本章选取某充换电平台, 分别针对住宅区私人充电桩、办公地专用充电桩以及电池换电站参与需求响应的运行效果进行对比分析。

#### 3.1 私人充电桩

该平台在上海市覆盖约3000个私人充电桩, 其中共有288个充电桩桩主报名参与2019年6月7日需求响应, 响应日当日实际参与响应的充电桩数量为159个, 实际响应充电桩占平台全部充电桩数量的比例为5.3%。可见, 虽然数量规模较大, 但私人充电桩的实际响应率偏低。此外, 私人充电桩分布较为分散, 且有较强私人属性, 其参与电力需求响应存在较高的个人隐私保护要求。

图2为上海市私人充电桩参与需求响应的效果对比图<sup>[12]</sup>。相比平日充电负荷(蓝色曲线), 参与响应的159个私人充电桩在响应日的充电负荷(红色曲线)明显提升。尤其在填谷响应时段(2:00~5:00)平均充电负荷达到1068 kW, 是平日(6月1日)该时段充电负荷的7.8倍。此外, 6月7日响应日159个响应充电桩平均充电量为64.5 kWh, 远高于平日(6月1日)日均充电量9.35 kWh, 由此判断有相当一部分车主将连续几日充电电量集中在6月7日响应时段, 可见价格激励对电动车主有较强引导效果。

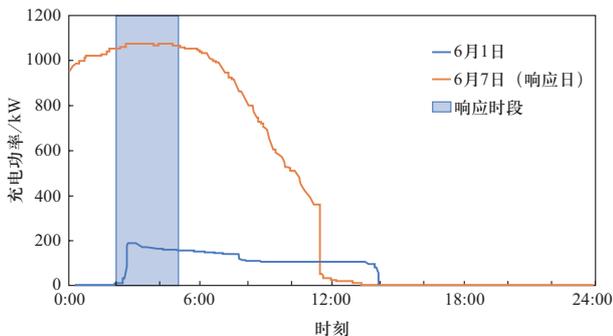


图2 私人充电桩填谷响应与平日充电负荷对比  
Fig. 2 Private chargers valley-filling effect

#### 3.2 专用充电桩

该平台某内部充电桩群共计安装110个专用充电桩, 其参与削峰响应的效果对比如图3所示<sup>[12]</sup>。红色曲

线为该充电桩群响应日(8月9日)的充电负荷, 2条虚线为平日(8月1、2日)充电负荷。其中, 响应时段(12:00~14:00)平均充电功率为43 kW, 相比平日该时段平均充电功率167 kW降幅达到75%, 需求响应参与度明显高于私人充电桩。由此可见, 企业内部充电桩一方面拥有与私人充电桩相似的车辆接入时间长的优势, 另一方面相比私人充电桩更便于开展集中充电行为管控, 其参与需求响应的可靠性也相对更高。

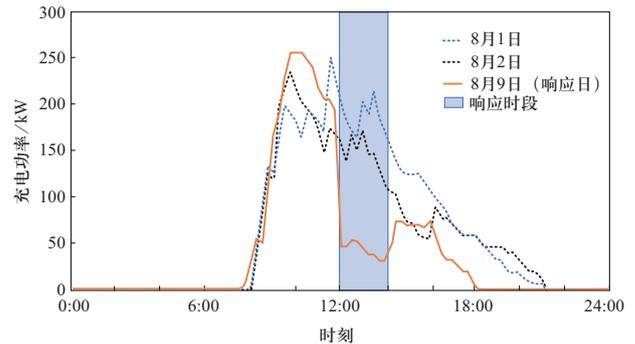


图3 专用充电桩削峰响应与平日充电负荷对比  
Fig. 3 Dedicated chargers peak-shaving effect

#### 3.3 换电站

图4为该平台9座换电站参与削峰响应合计效果对比<sup>[12]</sup>。其中, 绿色实线为换电平台响应日(12月5日)充电负荷, 各条虚线为11月25—29日连续5个工作日充电负荷。响应日响应时段(10:00~11:00)合计充电功率为140 kW, 相比平日平均充电功率745 kW降幅达到81.2%, 响应率为3种充电设施中最高。换电站参与需求响应的必要前提是拥有一定换电裕度, 换电服务强度的下降或增加换电站备用电池都可实现类似效果。

表2对3类充电设施参与电力需求响应的适应性进行对比。从上海市需求响应试点经验看, 虽然处于统

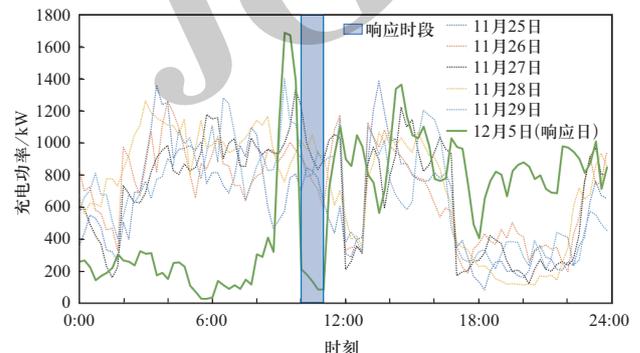


图4 换电站响应日与平日充电负荷对比  
Fig. 4 Battery swap stations peak-shaving effect

一充换电平台,但各类充换电设施参与电力需求响应的能力迥异。电动汽车接入私人桩的时段往往在傍晚至凌晨,更加适合参与负荷填谷,而专用桩和换电站的调节灵活度较高。从试点结果看,专用桩和换电站可实现相对集中管理,对调度指令的响应率也较高。需求响应资源量方面,私人桩和专用桩的规模潜力较大,应提前设计激励机制,加大私人桩和专用桩的资源潜力挖掘力度。虽然目前换电站具有一定调节潜力,但随着换电需求日益提升,其日间参与需求响应的能力取决于换电站的综合管控能力。

表2 试点案例3类充电设施需求响应适应性

Table 2 Demand response adaptation among three types of chargers

|       | 私人桩   | 专用桩    | 换电站   |
|-------|-------|--------|-------|
| 填谷/削峰 | 填谷    | 削峰/填谷  | 削峰/填谷 |
| 响应率   | 低     | 较高     | 高     |
| 资源潜力  | 高(数量) | 高(响应率) | 有限    |
| 日内调峰  | 可行    | 可行     | 可行    |

就参与需求响应的市场规模来看,专用充电桩的功率规模接近180 MW,为各类充电设施中最高。从试点结果看,目前私人充电桩响应率偏低,但由于私人充电桩数量多、车辆接入时间长,其需求响应的挖潜空间仍然很大。换电站响应率最高,但由于数量较少,且一定程度受换电服务强度的影响,响应规模相对有限。

需要注意的是,参与需求响应的立足点在于平日负荷基线,若电力用户平日已针对峰谷电价进行错峰用电或低谷用电,其参与需求响应的空间也可能受到影响。本次采集的各类充电设施平日基本未享受峰谷电价,因此不存在峰谷电价与需求响应价值冲突的问题。但对于平日执行峰谷电价的充电设施而言,参与需求响应与错峰充电的行为具有一定共性,所以激励机制的设计也需进一步完善。

此外,本案例中参与需求响应的车辆以纯电动车型为主,但也需考虑上海市插电式混合动力车型占比较高的现实。一方面插电式车型有限的充电需求将影响其需求响应规模,另一方面由于里程焦虑较小,插电式车型用户参与需求响应的接受度可能相对较高,其参与需求响应的综合效果仍有待更多样本数据验证。

## 4 试点经济性对比

### 4.1 私人充电桩

一般电力需求响应的成本包含初始技术投资、响应者机会成本、组织者实施成本。其中初始技术投资包括测量和通信系统更新升级成本、电力设备及软件成本、账务系统升级成本等。响应者机会成本包括因参与需求响应产生的不便或舒适性下降、作息日程变动带来的成本、自备电源的燃料和维护费用等。组织者实施成本包括项目管理和经营成本、市场营销成本、项目评估成本、用户培训成本等<sup>[13]</sup>。对于电动汽车而言,充电桩都已具备基本测量和通信功能,且私家充电桩停车时间较长,用户参与需求响应的机会成本也较低。第三方聚合商在私家电动汽车参与需求响应过程中扮演重要角色,其成本也相对较高。结合上海试点经验看,第三方聚合商的需求响应活动的组织成本主要包括补偿资金垫付和人工成本两方面。由于目前上海市电力公司对参与需求响应用户的资金补偿按年核算,实际支付补偿的时间明显滞后,第三方聚合商往往需要向用户提前垫付补偿资金。此外,目前充换电设施与电力需求响应平台还未实现自动化对接,电动汽车参与需求响应的事前事后数据由人工分析和决策,导致组织成本偏高。考虑到未来需求响应与充放电系统实现平台化对接,需求响应相关信息发布和用户响应决策可通过自动化流程实现,相关成本也将随之大幅降低。

电动汽车参与需求响应经济性计算过程如下。

$$F_{t,sc} = R_{dr} \times (1 - \alpha) - C_{dr} \quad (1)$$

$$R_{dr} = P \times k_4 \times \sum_{i=1}^n Q_i \times k_{1_i} \times k_{2_i} \times k_{3_i} \quad (2)$$

式中:  $F_{t,sc}$ 为参与需求响应第 $t$ 年净现金流,元;  $R_{dr}$ 为每年需求响应收益,元;  $\alpha$ 为需求响应组织方收益分成,假设为30%;  $C_{dr}$ 为每年需求响应运维成本,每年初投资2%;  $P$ 为统一出清价格,元/kW;  $Q$ 为用户单次受邀响应量,kW;  $n$ 为需求侧响应年度发布次数;  $k_1$ 为响应量系数,取1;  $k_2$ 为单次响应速度系数,私人桩取0.8,专用桩取0.8,换电站取2;  $k_3$ 为响应活动时长,私人桩取3,专用桩取2,换电站取1;  $k_4$ 为响应参与度系数,取1。

按照目前上海需求侧响应年度交易单边竞价规则,2019年度填谷需求响应竞价交易报价上限为1.2元/kWh,对私人充电桩提前24 h通知,则补贴系数

为0.8，若按竞价交易报价上限计算，则单位填谷补偿价格为0.96元/kWh。由于私人桩、专用桩、换电站实时响应能力由弱到强，本文按照日前通知设置私人桩和专用桩响应速度，按照提前0.5 h通知设置换电站响应速度。考虑到电动汽车具有较高响应精度，本研究假设其平均响应比例在80%~120%之间。此外，考虑到车辆在私人桩连接时间最长，其次为专用桩，换电站因换电运营强度约束持续响应时间最短，本文假设3类充电设施 $k_i$ 值分别为3, 2, 1。由于试点期间电动汽车不参与需求响应竞价，3类充电设施年度响应系数统一取1。基于私人充电桩需求响应成本和效益水平，本研究对电动汽车车主参与需求响应的经济性进行了分析。对于车主而言，在需求响应聚合商固定投资成本（500元/桩）和响应补偿单价确定的情况下，参与需求响应的频次决定了综合经济性水平。当响应频次较低，如3次/a情况下，单桩年均收益仅为42元（收益分成后，下同），而当响应频次达到10次/a，则单桩年均收益超过140元，参与需求响应的内部收益率达到27%。

## 4.2 专用充电桩

专用充电桩群参与需求响应的成本与私人充电桩类似，主要包括聚合商固定投资及运维成本，因此存在一定聚合商收益分成。目前上海市削峰需求响应补偿单价较高，补偿为30元/kW，折算为3元/kWh。若同样以提前24 h方式通知参与响应，则响应电量实际补偿为2.4元/kWh。由于具备较高的响应率及电价补偿，专用充电桩群参与需求响应的经济性相对较高。当响应频次为3次/a时，年补偿收益为70元，若响应频次提升至10次/a，则桩均年收益达到235元，内部收益率接近50%。

## 4.3 换电站

换电站参与需求响应的成本主要取决于换电服务强度和换电站内备用电池裕度。该换电平台换电站服务能力按照一天营业16 h、每站每天换电服务72次设计，则单站平均每小时换电4.5次。若每座换电站配备5块备用电池，每块备用电池充电功率60 kW，且换电强度按时间轴平均分布，则每站最多可调用约300 kW（时移1 h）灵活充电负荷。考虑到实际运营中换电服务时间分布存在一定波动，因此该充电裕度一般仅作为换电备用，难以满足需求响应的额外调节需求。但由于目前该换电平台运营强度还未达到饱和，平均每

站实际换电频次约3次/h，即每站约有2块备用电池或120 kW充电功率可实现全天候负荷时移。虽然通过增加备用电池数量可以相应提升充电灵活度，但单纯为参与需求响应增加备用电池近似于储能电站的运营模式，在目前的响应频次及响应补偿水平下，经济性显然不足。

鉴于换电站具有较强的充电时间管控能力，12月5日响应日当日提前通知量仅为30 min，则削峰响应的补偿单价可达6元/kWh，远高于私人充电桩和专用充电桩价格补偿水平。若年均响应次数为3次，单站年均收益就达到1500元以上；若响应次数达到10次，单站年均收益将超过5000元。

## 5 分析与讨论

为与需求响应进行对比，本文对电动汽车参与错峰充电和调峰辅助服务的经济性水平进行了测算。其中错峰充电指电动汽车通过降低高峰电价时段充电电量降低充电成本。根据上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心的统计<sup>[14]</sup>，电动汽车平均每次出行里程为20.1 km，若日均行驶里程为50 km，则保证一次出行所需电量的基础上，每天可灵活调节的剩余充电量占全天充电量的60%左右。因此经济性收益计算过程为

$$F_{t,SC} = P_{TOU} \times E_{shift,SC} - C_{SC} \quad (3)$$

$$E_{shift,SC} = C_E \times M \times 60\% \times 365 \quad (4)$$

式中： $F_{t,SC}$ 为错峰充电第 $t$ 年净现金流，元； $P_{TOU}$ 为充电电价峰谷差，元/kWh，私人桩采用居民峰谷电价差0.31元/kWh，专用桩及换电站采用一般工商业峰谷电价差0.583元/kWh； $E_{shift,SC}$ 为错峰充电每年转移电量，kWh； $C_{SC}$ 为错峰充电设备运维成本，每年初投资2%； $C_E$ 为车辆行驶电耗，0.15 kWh/km； $M$ 为车辆日均行驶里程，50 km/d。

调峰辅助服务指电动汽车跟踪电网调峰辅助服务指令执行有序充电的过程。目前国内调峰辅助服务主要由发电及电网企业提供，电动汽车等负荷侧第三方参与调峰市场案例较少。本文采用目前华北第三方主体参与调峰市场出清价格（0.2元/kWh）为例，分析电动汽车参与调峰辅助服务的经济性，计算过程为

$$F_{t,AS} = \overline{P}_{AS} \times E_{shift,AS} \times (1 - \alpha) - C_{AS} \quad (5)$$

$$E_{shift,AS} = C_E \times M \times 60\% \times 365 \quad (6)$$

式中： $F_{t,AS}$ 为调峰服务第 $t$ 年净现金流，元； $\overline{P}_{AS}$ 为调峰服务平均度电补偿，0.2元/kWh； $E_{\text{shift},AS}$ 为调峰服务年转移电量，kWh； $\alpha$ 为需求响应组织方收益分成，假设为30%； $C_{AS}$ 为调峰服务运维成本，每年初投资2%； $C_E$ 为车辆行驶电耗，0.15 kWh/km； $M$ 为车辆日均行驶里程，50 km/d。

本文采用内部收益率（internal rate of return, IRR）对比各充电模式参与需求响应、峰谷价差套利及调峰辅助服务的经济性，即当智能充电项目净现值（NPV）为0时的IRR值：

$$V_{NPV} = \sum_{t=1}^T \frac{F_t}{(1+R_{IRR})^t} - C_0 = 0 \quad (7)$$

式中： $V_{NPV}$ 为项目净现值，元； $F_t$ 为项目 $t$ 年净现金流，元； $R_{IRR}$ 为项目内部收益率； $C_0$ 为项目初期投资成本，本文取每kW的成本为500元； $T$ 为项目运行周期，取12 a。

表3为3种充电方式各自参与需求响应、错峰充电、调峰辅助服务的经济性差异。尽管居民峰谷电价差相对偏低，但其经济性仍然最高。虽然需求响应补偿单价较高，但每年响应频次偏低，影响了其综合收益。调峰辅助服务与错峰充电工作频率相近，但就目前调峰市场价格来看，单位调峰电量的经济性补偿十分有限。此外，目前电动汽车参与需求响应及调峰辅助服务2种模式仍面临一定市场门槛，往往需要通过充电负荷聚合商等第三方主体做好具体市场衔接工作，也因此存在一部分收益分成（30%），降低了其综合经济性表现。

表3 内部收益率对比结果

Table 3 Internal return rate comparison among three types of charger

| 模式     | 私人桩 | 专用桩  | 换电站  |
|--------|-----|------|------|
| 需求响应   | 9%  | 47%  | 101% |
| 错峰充电   | 52% | 100% | 304% |
| 调峰辅助服务 | 20% | 20%  | 71%  |

综合来看，目前电动汽车参与电网互动已具备较高经济性水平，但需求响应、调峰辅助服务等市场化机制的价格吸引力相对有限。此外，上海市电动汽车参与需求响应的补偿直接采用竞价交易报价的上限执行，未来需求响应及调峰辅助服务补偿价格可能因用电负荷增长、新能源接入、需求侧资源增多等因素产生波动，这对充电负荷集成商成本控制和抗风险能力有更高要求。因此，基于用户侧峰谷电价的错峰充电仍是当前电动汽车参与电网互动收益最为稳定的商业

运营模式。

在上海市电动汽车参与需求响应试点实施中，为提升执行效率、吸引用户侧参与，采取了积极措施。一是充电运营商作为中间机构，提供用户侧需求响应资源聚合管理支撑，并对用户进行业务指导，提高了执行过程中认购、响应、结算等环节的效率；二是上海市用尖峰电价的增收电费设置了需求侧响应补贴资金，且根据响应质量设置了不同额度的奖励标准；三是上海市电动汽车参与需求响应执行模式正在向自动化方向探索和发展，明确规定了需求响应数据采集、传输、通信协议等技术要求。

但是试点也反映出当前电动汽车参与需求响应存在的一些问题。一是自动化需求响应的实施需要先进的智能化终端、通信技术、需求响应系统等支撑，前期投入高。充电运营商需承担计量设备安装维护、在线监测系统、通信网络的成本，而且未来需求响应业务要求更加灵活、快速，充电运营商还将进一步承担设施的改造、平台的升级成本。目前激励仅针对参与需求响应的用户，但对软硬件设施的补贴尚不明确<sup>[15]</sup>。二是响应量预测技术和动态调度能力欠缺。目前许多充换电设施未报装，响应负荷核定存在难度。同时，电动汽车参与电力需求响应业务发展刚起步，试点项目开展数量有限，因此缺少实测数据用于负荷响应特性研究，难以准确刻画电动汽车响应行为<sup>[16]</sup>，而运营商也尚未建立实时有效的动态调节能力。三是目前电动汽车参与需求响应的试点大多依赖半行政化的有序用电系统配合才能够顺利开展，没有建立起成熟的商业模式，补贴资金依赖财政支持，缺乏可持续性，衔接电力辅助服务的需求响应试点也存在辅助服务成本疏导问题。四是电动汽车充电基线的认定仍存在争议，如何协调需求响应与峰谷电价政策的关系还需机制创新。五是电动汽车作为负荷侧资源仍单边竞价参与市场，还未实现与发电侧资源的同台竞争，如何构建基于全网资源的电力市场体系仍面临技术及政策挑战。

## 6 政策建议

推动电动汽车与电网互动对中国交通和能源变革具有重大战略意义。因此应积极推进电动汽车参与需求响应的试点工作，尤其在市场准入、激励机制、能力建设方面做好政策保障。

首先，应鼓励实施主体多元化，丰富需求响应业

务内容。明确电动汽车参与电力市场的准入边界条件,明确电动汽车移动储能资源的市场身份与地位,适度降低电动汽车参与市场的容量门槛,实现应用场景多样化。建议由电网公司主导向多主体实施发展,分级能源交易中心可自主执行补贴、结算。培育充电运营商调度能力,挖掘私人充电桩车网互动的潜力,并为需求侧资源提供能源管理、设备维护、节能等增值服务,利用平台所积累的海量数据,深度推进智能用电业务的开展,提升电动汽车调控规模、可靠性、稳定性。

其次,应设计合理的激励机制,逐步完善车网互动的市场机制。近中期,以政策激励为主推动需求响应发展,充分发挥需求响应降低配电网投资的价值,以销售电价附加征收的城市公用事业附加费、执行差别电价增加的电费收入等作为需求响应补贴资金来源,按补偿成本和合理收益的原则,明确电网企业、电动汽车车主、充电运营商等各方利益分享方式,并为参与需求响应的车主设计提供合适的电池质保、保险产品。中长期,随着电力改革不断深化,需求响应开展将更加市场化,应同步完善充电运营商与电动汽车车主参与需求响应的竞价机制与考核机制。

最后,应加快推进车网互动能力建设,规范化、精细化需求响应资源管理。建立支持电动汽车参与电力市场的软硬件环境,以实现大规模需求侧负荷的在线监控和双向交互机制,推动车网互动常态化、智能化、自动化开展。对于计量设备、平台研发与建设、公共网络租赁,给予财政资金支持。完善需求响应终端、系统、通信网络、安全规范等方面的标准体系,规范需求响应各系统间的接口,实现信息交互标准化,保障设备与系统间的良好互操作管理。

## 致谢

本文基于自然资源保护协会支持的“电动汽车与电网互动的商业前景——上海市需求响应试点案例”项目撰写,中国电动汽车百人会、自然资源保护协会、国网上海市电力公司和蔚来汽车等机构为本文提供了数据和信息支持,在此特别表示感谢。

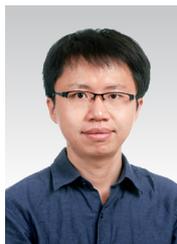
## 参考文献

[1] 何正友, 向悦萍, 杨健维, 等. 电力与交通系统协同运行控制的研究综述及展望[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 569-581.

- HE Zhengyou, XIANG Yueping, YANG Jianwei, et al. Review on cooperative operation and control of transportation and power systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 569-581(in Chinese).
- [2] 陈静鹏, 朴龙健, 艾芊, 等. 基于分布式控制的电动汽车分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 24-31. CHEN Jingpeng, PIAO Longjian, AI Qian, et al. Hierarchical optimal scheduling for electric vehicles based on distributed control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 24-31(in Chinese).
- [3] 宋辉, 徐永海. 规模化电动汽车充电对配电网电压质量的影响及其对策[J]. 现代电力, 2017, 34(3): 30-35. SONG Hui, XU Yonghai. Impact of large-scale electric vehicle charging on voltage quality of distribution network and relevant countermeasures[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(3): 30-35(in Chinese).
- [4] 张纲, 逯帅, 刘永相, 等. 基于充电权交易的区域充电微市场运营策略[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 509-515. ZHANG Gang, LU Shuai, LIU Yongxiang, et al. Regional operation of charging micro-markets based on trading of electric vehicle charging rights[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 509-515(in Chinese).
- [5] 项顶, 胡泽春, 宋永华, 等. 通过电动汽车与电网互动减少弃风的商业模式与日前优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(24): 6293-6303. XIANG Ding, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Business model and day-ahead dispatch strategy to reduce wind power curtailment through vehicle-to-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(24): 6293-6303(in Chinese).
- [6] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23. TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23(in Chinese).
- [7] 刘坚. 电动汽车储能技术应用潜力及功能定位研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 44-50. LIU Jian. An analysis on the application potential and position of electric vehicle energy storage[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 44-50(in Chinese).
- [8] 潘樟惠, 高赐威, 刘顺桂. 基于需求侧放电竞价的电动汽车充放电调度研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1140-1146. PAN Zhanghui, GAO Ciwei, LIU Shungui. Research on charging and discharging dispatch of electric vehicles based on demand side discharge bidding[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1140-1146(in Chinese).
- [9] 刘敦楠, 王梅宝, 李根柱, 等. 电动汽车参与电力市场的商

- 业运营模式研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(5): 516-524.  
LIU Dunnan, WANG Meibao, LI Genzhu, et al. Business model for optimal electric vehicle participation in electricity market[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(5): 516-524(in Chinese).
- [10] 白宏坤, 王江波, 刘军会, 等. 不同调峰模式下负荷聚合商参与程度研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(5): 16-18.  
BAI Hongkun, WANG Jiangbo, LIU Junhui, et al. Research on degree of participation of load aggregators in different peak-shaving modes[J]. Electrical Automation, 2019, 41(5): 16-18(in Chinese).
- [11] 杨军, 林洋佳, 陈杰军, 等. 未来城市共享电动汽车发展模式[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 49-59.  
YANG Jun, LIN Yangjia, CHEN Jiejun, et al. The future development mode of sharing electric vehicles in the cities[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(4): 49-59(in Chinese).
- [12] 中国电动汽车百人会, 自然资源保护协会. 电动汽车与电网互动的商业前景——上海市需求响应试点案例[R/OL]. (2020-06)[2020-08]. <http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=250&cook=2>.
- [13] 蓝天虹. 需求响应的成本收益构成及其分配[J]. 节能与环保, 2010(11): 26-28.
- [14] 上海市新能源汽车公共数据采集与监测研究中心. 上海新能源汽车市场特征与用户行为研究报告[R]. 上海, 2016.
- [15] 全生明, 卢键明, 谢传胜, 等. 需求侧响应机制的国际经验及对我国的启示[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(2): 73-76.  
QUAN Shengming, LU Jianming, XIE Chuansheng, et al. International experience of demand-side response mechanisms and enlightenment to China[J]. Power Demand Side Management, 2009, 11(2): 73-76(in Chinese).
- [16] 李彬, 陈京生, 李德智, 等. 我国实施大规模需求响应的关键问题剖析与展望[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 694-704.  
LI Bin, CHEN Jingsheng, LI Dezhi, et al. Analysis and prospect of key issues in China's demand response for further large scale implementation[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 694-704(in Chinese).

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-12-08。



刘坚

作者简介:

刘坚(1983), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为储能、新能源汽车、氢能、可再生能源领域技术经济性及市场政策研究, E-mail: liuj@eri.org.cn。

张永伟(1973), 男, 博士, 研究方向为新能源汽车与智能网联汽车顶层设计、制度创新、法律法规、技术战略等。通信作者, E-mail: 13521590117@163.com。

(责任编辑 李锡)