2020 年 6 月





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

研究报告

China EV100 中国电动汽车百人会

NRDC 自然资源保护协会 NATURAL RESOURCES DEFENSE COUNCIL

致谢

特别感谢上海电力需求响应中心、上海蔚来汽车有限公司、万帮充电设备有限公司、普天新能源有限责任公司、上海依威能源科技有限公司、北京小桔新能源汽车科技有限公司、上海国际汽车城集团对本研究提供的信息和数据支持。感谢中电联标准中心主任刘永东先生、清华大学电机系胡泽春老师、中科院电工研究所陈永翀老师、国网储能云平台事业部总经理王明才先生、特来电新能源有限公司副总裁兼首席科学家龚成明先生对本项目提出了宝贵意见，也在此表示感谢。

课题组成员

中国电动汽车百人会车百智库

张永伟　朱晋　熊英　刘茜

国家发改委能源研究所

刘坚

自然资源保护协会 清洁电力项目组

金亨美 游梦娜 王万兴 刘明明 冯婕茹

感谢 ClimateWorks Foundation 对本研究的资金支持。

摘 要

电动汽车可作为高度灵活的移动储能单元，在调节电力负荷、消纳可再生能源、改善电能质量等方面应用潜力巨大。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。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。

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，积累了丰富的需求响应工作经验。本研究根据上海市电动汽车参与电力需求响应的试点结果，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，发现车辆在不同充换电场所够提供的充电灵活性调节规模各异，各自实现的响应效果也存在较大差别。例如，虽然私人充电桩数量较多，但目前响应率偏低，其需求响应潜力仍有待挖掘。换电站因参与实时需求响应而具有较高收益，但其综合经济性取决于换电站备用电池的裕度。

国外有不少推动电动汽车负荷作为电力系统灵活性资源的案例。电力公司实施的分时电价以及充电电价套餐等是较简单的实施模式。在不少案例中，电动汽车充电负荷通过集成商平台，参加电力现货市场竞价。车网双向互动的应用还是在早期阶段，但少数案例已在商业化方面取得良好的效果。不管是哪种模式，国内外案例之间最大区别为市场机制是否到位。虽然国外的很多案例也未必完全实现商业化运营，但市场环境下的商业模式探索从未停止。

最后，本研究提出了进一步推动车网互动发展的政策建议，包括：明确电动汽车参与电网互动的市场准入、建立车网互动的市场机制、加快推进车网互动能力建设等。

目 录

第一章 上海电力系统发展概况 1
一、 趋势与挑战 1
（一）电力消费和电力结构 1
（二） 负荷峰谷差挑战 2
二、 需求响应试点 3
第二章 电动汽车与电网互动的潜力 5
一、 上海电动汽车发展及其对电力系统的影响 5
二、 中国电动汽车与电网互动的现状 5
第三章 电动汽车参与需求响应城市试点 8
一、 试点设计 8
（一）背景 8
（二）流程与技术要求 8
（三）激励措施 9
（四）参与方 10
二、 试点结果 11
（一）私人充电桩 11
（二）专用充电桩 13
（三）换电站 15
三、 试点经验 18
（一）三类充电设施参与电力需求响应竞争力对比 18
（二）错峰充电用户参与需求响应的潜力 18
（三）需求响应实施方式 20
第四章 国际经验对比 22
一、 基于电力公司分时电价 22
二、 电力市场与需求响应相结合 25
三、 车网互联（V2G） 26
四、 国际案例经验总结 29
第五章 政策建议 30

第六章 下一步工作方向 31
附件 1：上海市 2019 年需求侧响应补偿计算方式 32
附件 2：需求响应经济性计算方法 33

图表目录

图 1 上海市三产与居民用电量（亿千瓦时） 1
图 2 上海电力来源（亿千瓦时） 2
图 3 上海地区最大峰谷差趋势 3
图 4 电动汽车与电网互动关系图 6
图 5 私人充电桩填谷响应与平日充电负荷对比 11
图 6 专用充电桩削峰响应与平日充电负荷对比 14
图 7 换电站响应日与平日充电负荷对比 15
图 8 上海市三类充电设施需求响应收益率及应用规模对比 17
图 9 需求响应与直接错峰充电效果重合示意图 19
图 10 需求响应与智能错峰充电效果重合示意图 20
图 11 美国加州 PG&E 电力公司的电动汽车充电分时电价 23
图 12 iChargeForward 用户参与度 24
图 13 在 iChargeForward 电动汽车与电池梯次利用贡献对比 24
图 14 美国南加州爱迪生电力公司西部地区日前竞价与需求响应 25

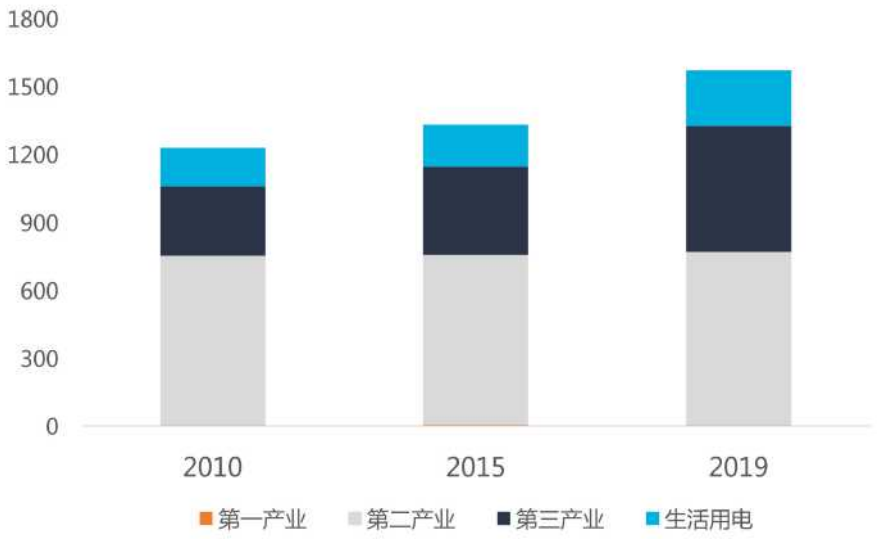
表 1 中国车网互动的部分试点项目与前景 7
表 2 补偿系数规则 9
表 3 部分运营商在上海的充电设施布局及报装情况 10
表 4 私人充电桩填谷需求响应经济性分析 13
表 5 专用充电桩削峰需求响应经济性 14
表 6 换电站削峰需求响应经济性 16
表 7 内部收益率对响应单价减半的敏感度对比 17
表 8 试点案例三类充电设施需求响应竞争力对比 18
表 9 全球十大 V2G 项目 26
表 10 Parker 项目服务 27
表 11 Redispatch 项目服务 28
表 12 City-zen 项目服务 28
表 13 Smart Solar Charging 项目服务 29

第一章 上海电力系统发展概况

一、趋势与挑战

(一) 电力消费和电力结构

2019 年上海市全社会用电量为 1,568 亿千瓦时，近几年上海用电量增长较平稳，2010-2019 年期间用电量年复合增长率为 2.7%，与当地产业结构和发展特点息息相关。从电力消费结构看，第三产业和居民生活用电量增长较快，特别是金融、房地产、商务及居民服务业电力消费贡献突出；工业用电量稳定，占电力消费总量的比例最大；农业用电量在 2019 年占用电量比例不到 0.5%，且逐年下降。



来源：上海市统计年鉴，上海市发改委

图 1 上海市三产与居民用电量（亿千瓦时）

上海市对外来电力依赖程度高，近年来外来输入电量越来越大。2018 年上海本地发电量为 856 亿千瓦时，区外输入量为 855 亿千瓦时。从本地电源装机结构看，上海市内电源装机总量 2,467 万千瓦，其中燃煤机组所占比重最大，超过 60%。市

外电源则形成了 2+X 供给格局：一是安徽煤电，二是三峡和金沙江等西南水电，此外还有江浙核电、抽水蓄能发电等 [1,2]。



来源：上海市统计年鉴

图 2　上海电力来源（亿千瓦时）

（二）负荷峰谷差挑战

近年上海市用电负荷波动性强，且随着市外可再生能源大规模馈入，上海电网调峰压力持续增加。2017 年上海统调最大用电峰谷差已达 13GW，且需求侧负荷的波动性大，商业、工业以及居民生活中的夏季供冷用电需求占到最高负荷的 40%-45%[3]。

1　张瀚舟 . 上海能源从高速度向高质量发展的实践与思考 . 2018,(12): 941-946.
2　陈晖 , 章树荣 . 上海“十二五”期间电力发展综述 . 2017,(3): 121-124.
3　叶剑 , 徐逸清 , 黄一超 , 等 . 上海电网用电负荷特性分析 . 电力与能源 , 2017, 38(6): 659-663.

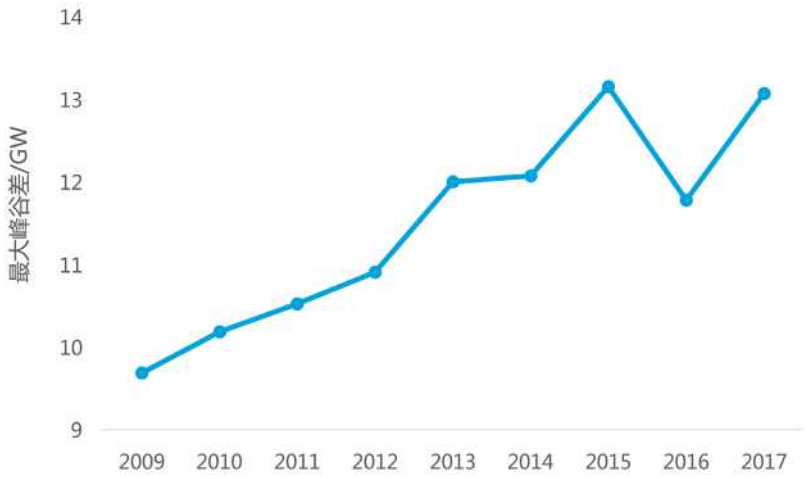


图 3　上海地区最大峰谷差趋势 [4]

外来电规模日益增大和可再生能源优先消纳趋势带来本地电网调度运行和管理压力。上海目前不参加调峰的市外来电负荷达 1,000-1,100 万千瓦，占全市最高负荷比重大于 50% 的时间超过 6 个月 [5]。市外大规模清洁电力密集馈入叠加上海特大城市电网峰谷用电特性，上海本地机组调停压力显著增加 [6]。未来外来电规模有进一步扩大的可能，市外可再生能源等仍将是首要和主要消纳对象，再加上电网建设趋于饱和，提升需求侧灵活性调节能力势在必行。

二、 需求响应试点

需求响应的实施是有效缓解电网调峰等运行压力，促进新能源发电消纳的重要措施。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，近年来积极探索用经济手段，激励全类型城市可控负荷资源参与“削峰”与“填谷”试验。2015-2018 年间上海市共开展了 8 次需求响应试点活动，应用场景不断扩大，不过主要参与者是商业、建筑以及工业企业客户。2019 年上海市又开展了 6 次试点活动，其中端午节开展的“填谷”需求响应试点中，首次接入电动汽车。

4　廖强强，陈建宏，师雅斐 , 等 . 储能技术的现状、趋势及对上海储能发展的建议 . 上海电力学院学报 , 2020, 36(1): 93-98.
5　夏凉 , 黄平 , 郭羽 . 上海市中小燃煤机组燃机替代研究 . 上海节能 , 2019,(2): 110-115.
6　刘坚 , 金亨美 , 唐莉 . 电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究 . NRDC. 2016 年 9 月 .

上海市经过 5 年多的需求响应试点工作，已初步形成一些需求响应资源及响应机制，2019 年，上海市发布《需求侧响应年度交易单边竞价规则》、《上海虚拟电厂运管平台与虚拟电厂信息交互规范》，并着手建立需求响应的可控资源库，从常态需求响应向虚拟电厂过渡，对各平台之间数据交互、控制方式自动化提出了更高要求，同时对参与者的响应能力也逐步提高门槛。2019 年 10 月，国网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。上海虚拟电厂运营体系由交易平台、运营管理与监控平台等系统组成[7]，已有 500 多个电力用户接入，各类柔性负荷调控能力得到不断提升。为进一步平衡电力负荷、缓解电网运行调节压力、加强需求响应精细化管理、促进可再生能源消纳，上海还在继续进行有益的探索。

7 上海市经济和信息化委员会 . 国内首个虚拟电厂运营体系投入试运行 .20191223. http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2315/nw31406/u21aw1416499.html

第二章 电动汽车与电网互动的潜力

一、上海电动汽车发展及其对电力系统的影响

截至 2019 年底，上海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，位居全国前列，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，电动汽车充电负荷对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的不确定性，电动汽车充电负荷具有较大的随机性，这将加大电网优化控制的难度。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，可能引起电能质量问题。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。上海市电动汽车保有量位居全国前列，私家车、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市电网的影响不容忽视。

二、中国电动汽车与电网互动的现状

为探索车网互动路径，国内电力需求响应试点正逐步纳入电动汽车资源，并探索其电力系统多重应用价值。

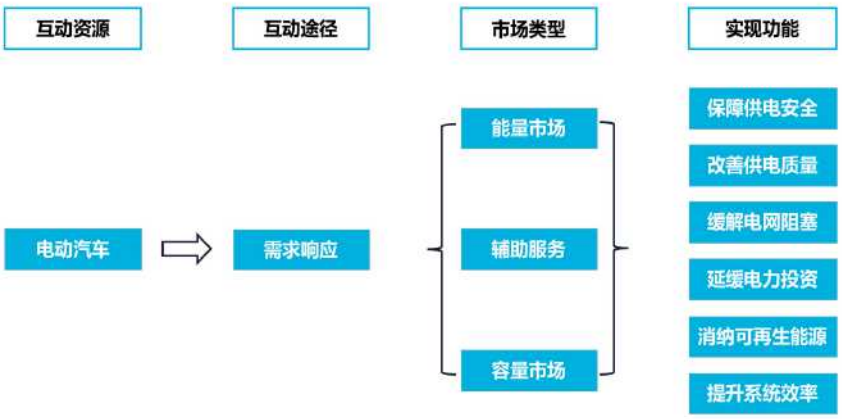


图 4　电动汽车与电网互动关系图

在车网互动的具体应用场景的示范上，国内许多地方进行了积极探索。电力辅助服务市场场景下，电动汽车具有双向调节和响应速度快的优点，可以提供调频和旋转备用服务[8]。目前我国上海、江苏、河南、山东、天津等地已启动了需求响应市场，从各地实践情况看，公共充电站、小区直供充电桩已有参与实例。但是需求响应的补偿资金缺乏可持续机制，且多数城市峰谷电价差较窄，用户侧利用峰谷价差套利空间有限。现阶段我国电力辅助服务市场主要针对火电等大容量可调度的发电侧资源设计，在充放电功率、持续充放时间、充放电量规模等方面准入门槛较高，缺乏对分散型用户侧资源的准入政策且补偿额度低。此外，北京、重庆两地进行了绿电交易的探索，分布式光储充项目也在多地实践，但由于集中式可再生能源弃电存在不确定性，而分布式光伏消纳问题仍不突出，相比其他场景经济效益有限。目前，现货电能市场仍在建设期，电动汽车参与电力现货市场的地位没有得到充分确立。

相比有序充电，目前市场上配备放电功能的新能源汽车和双向充电桩的数量都有限，因而用户很难参与充放电互动。同时，充放电模式下，用户面临动力电池寿命加速衰减的成本问题。因此，近中期，有序充电的可行性高于充放电，但随着电池成本降低，充放电的优势将逐步显现。

8　沈运帷 , 李扬 , 高赐威 , 周磊 . 需求响应在电力辅助服务市场中的应用 . 电力系统自动化 , 2017,41(22): 151-161.

表 1 中国车网互动的部分试点项目与前景

场景	试点案例	优势与前景	问题
辅助服务	北京、上海、河南、江苏、天津、广东、山东等地广泛开展小区、公共场站、园区有序充放电； 华北调峰辅助服务试点； 多地高速、工业园区开展分布式光储充一体化模式。	电动汽车双向调节和响应速度快的优点与辅助服务需求相适应； 辅助服务补偿收益较高。	现阶段我国电力辅助服务市场设计存在充放电功率、持续充放时间、充放电量规模等准入门槛，缺乏分散型用户侧资源的准入政策； 二次调频市场容量有限； 可再生能源消纳市场空间存在不确定性。
能量市场	广州计划开展电动汽车参与现货市场试点； 北京、重庆等地电动汽车消纳跨省绿电交易。	市场潜力大。	电动汽车参与电力市场的地位尚未得到充分确立； 多数城市峰谷电价差较窄，用户侧利用峰谷价差套利空间有限。

资料来源：公开资料整理

第三章 电动汽车参与需求响应城市试点

一、试点设计

(一) 背景

上海市需求响应试点一直在努力扩大非工业可控负荷，随着电动汽车数量不断增多，其作为需求响应资源的价值日益突显。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。

本研究利用上海市 2019 年 3 次电动汽车参与需求响应试点活动的数据，分析车网互动的经济性与发展潜力。具体试点时间分别为 2019 年 6 月 7 日凌晨 2-5 点、2019 年 8 月 9 日 12-14 点，以及 2019 年 12 月 5 日 10-11 点。

(二) 流程与技术要求

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（所有充电桩的总加功率与电量）、接入资源（例如独立报装的场站、有营销户号的对象）、虚拟发电机机组（例如充电桩）。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。负荷基线历史数据是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；参与响应的时间最短 1 小时。

3）实时数据上报：充电功率、电量数据以 15 分钟的频率向平台上报。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；考核不要求是在线接口数据，而是按照运营商线下上报的数据来核算。

4）费用结算。用户的负荷基线与实际的电力负荷曲线的差值即是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，并按照实际响应量来给补偿。

(三) 激励措施

目前上海市响应量的计量模型是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。分成削峰和填谷两个类型，补偿价格上限（基准值）削峰响应为 30 元 / 千瓦，填谷响应为 12 元 / 千瓦。获取补偿基准值的前提是，单个用户响应的次数不超过 10 次 / 年，响应时长不超过 10 小时 / 年。在此基础上，根据单次响应量、通知时间提前量、单次响应时长、年度响应参与度进一步计算补偿系数。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。具体补偿规则如下表所示：

表 2　补偿系数规则

单次响应量系数				
K1_i	响应比例	价格调整系数	备注	
	〈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	
* 响应量比例 = 响应量 / 签约响应量				
单次响应速度系数				
K2_i	通知时间	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			
K3_i	Ti/10	（单次需求响应活动期时长 Ti，精确到小时）	
年度响应参与度系数			
K4	响应时长比例	价格调整系数	备注
	（0，0.3]	0	
	（0.3，0.8]	ktime_1	
	（0.8，1]	1	竞价基准

(四) 参与方

在上海市经信委支持下，上海市电力公司和自然资源保护协会 (NRDC) 作为主要协调方，积极邀请充电服务商和主机厂参与需求响应。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。这些运营商的充换电设施支持远程有序调控功能，充电数据采集按照中电联的标准协议，采集频率 20-30 秒 / 次，且数据存储周期比较长，但大多数充电桩未报装。

表 3　部分运营商在上海的充电设施布局及报装情况

	公桩（个）	私桩（个）	专用桩（个）
普天	1000（未报装）		100（已报装）
蔚来	15 个换电站（未报装）	3000（报装 2000 个）	110
依威能源	2700（报装 65 个）		
星星充电	5800（大部分未报装）		1000（已报装）

来源：调研数据整理。数据截止时间 2019 年 10 月。

二、试点结果

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够提供的充电灵活性调节规模各异，各自实现的响应效果也存在较大差别。本节将选取蔚来的充换电平台运行情况，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。

(一) 私人充电桩

蔚来汽车充电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，实际响应充电桩占全部平台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有限。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。

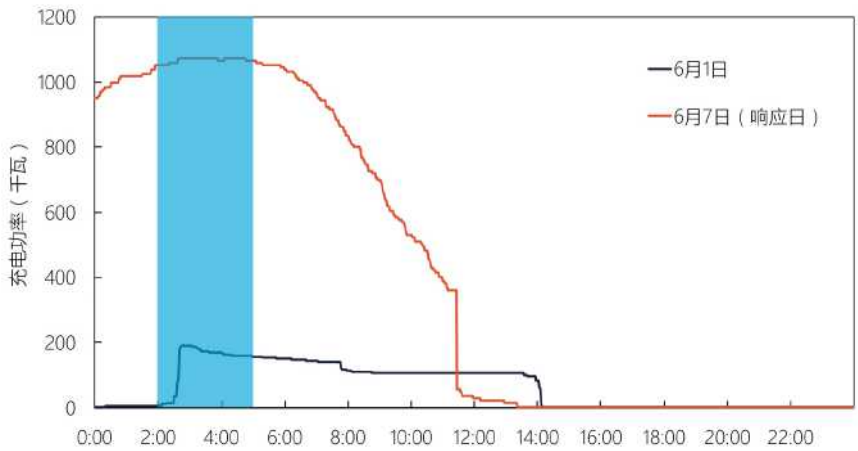


图 5　私人充电桩填谷响应与平日充电负荷对比

图 5 为上海市私人充电桩参与需求响应的效果对比图。相比平日充电负荷（蓝色），参与响应的 159 个私人充电桩在响应日的充电负荷明显提升。尤其在填谷响应时段（2:00 –5:00）平均充电负荷达到 1,068 千瓦，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 千瓦时，远高于平日（6 月 1 日）日均充电量 9.35 千瓦时，由此我们判断有相当一部分电动汽车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。

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[9]。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，由于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。

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 / 千瓦时，对私人充电桩提前 24 小时通知，则补偿系数为 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 / 千瓦时。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 / 年的情况下，则单桩年均收益仅为 42 元（收益分成后，下同），而当响应频次达到 10 次 / 年，则单桩年均收益率超过 140 元，参与需求响应的内部收益率达到 27%。

9　蓝天虹 . 需求响应的成本收益构成及其分配 . 节能与环保 . 2010(10): 26-28.

表 4　私人充电桩填谷需求响应经济性分析

主要假设			
聚合商固定投资（元）	500	单次响应时长（小时）	3
单车充电功率（千瓦）	7	响应速度	提前 24 小时
响应类型	填谷	响应单价（元 / 千瓦时）	0.96
响应率（%）	5.3%		
分析结果			
响应次数（次 / 年）	3	5	10
年均收益（元 / 年）	**42**	**71**	**141**
内部收益率（%）	**<0**	**9%**	**27%**

对电网而言，电动汽车填谷需求响应的价值可通过其对外来可再生能源电力新增消纳得以体现。若单桩每年参与填谷需求响应 5 次全部用于外来可再生能源消纳，每次响应持续时间 3 小时，则单桩每年新增可再生能源消纳量达到 105 千瓦时。目前上海市约有 19 万个私人充电桩，假设平均单桩功率 7 千瓦，平均响应率达到 5.3%，则电动汽车填谷功率可达到 7 万千瓦，每年新增可再生能源消纳能力为 105 万千瓦时。

(二) 专用充电桩

该平台下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 6 所示。红色曲线为该充电桩群响应日（8 月 9 日）的充电负荷，两条虚线为平日（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 千瓦，相比平日该时段平均充电功率 167 千瓦降幅达到 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，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。

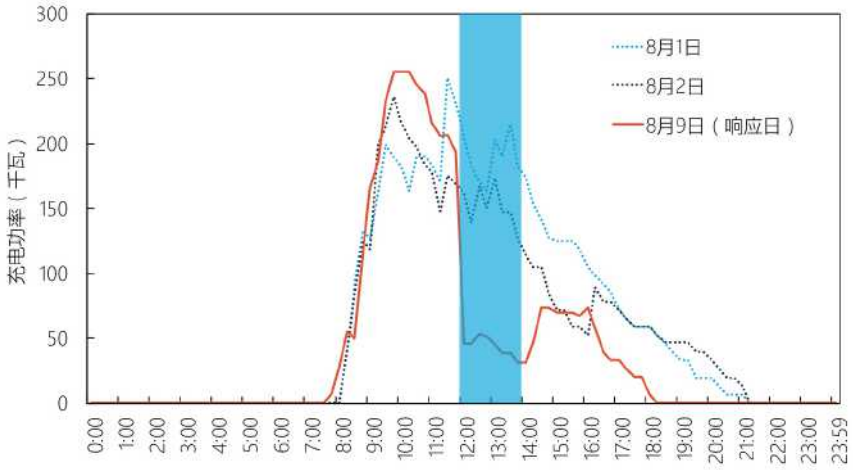


图 6　专用充电桩削峰响应与平日充电负荷对比

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，单位千瓦补偿 30 元，折算每千瓦时电量为 3 元。若同样以提前 24 小时方式通知参与响应，则单位千瓦时响应电量实际补偿为 2.4 元。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。表 5 为专用充电桩削峰需求响应经济性分析。当年响应频次为 3 次时，年补偿收益为 70 元，若响应频次提升至 10 次 / 年，则桩均年收益达到 235 元，内部收益率接近 50%。

表 5　专用充电桩削峰需求响应经济性

主要假设			
聚合商固定投资（元）	500	单次响应时长（小时）	2
单车充电功率（千瓦）	7	响应速度	提前 24 小时
响应类型	削峰	响应单价（元 / 千瓦时）	2.4
响应率（%）	75%		
分析结果			
响应次数（次 / 年）	3	5	10
年均收益（元 / 年）	70	118	235
内部收益率（%）	9%	21%	47%

对电网而言，削峰需求响应的价值可部分通过容量 / 需量电价水平反映。我国基本电费一般按照变压器容量（千伏安）或按最大需量（千瓦）计量，用户可自由选择计量方式。对于按照变压器容量计量的用户，其基本电费为变压器容量与基本电价之积；对于按照最大需量计费的用户，其基本电费为最大需量与基本电价之积（一般最大需量对应基本电价高于变压器容量对应基本电价）。目前上海市两部制未分时一般工商业需量电费为 37.8 元 / 千瓦，则单位千瓦削峰容量价值为 454 元 / 年。目前上海市拥有专用充电桩 4 万个，假设桩均充电功率为 7 千瓦，响应率为 75%，则专用桩合计削峰容量为 21 万千瓦。

（三）换电站

图 7 为该平台下换电站参与削峰响应的效果对比图。其中，红色曲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 日至 29 日连续五个工作日充电负荷，点划线代表平日（25 日 -29 日）平均充电负荷。响应日响应时段（10：00-11：00）合计充电功率为 140 千瓦，相比平日平均充电功率 745 千瓦降幅达到 81.2%，响应率为三种充电设施中最高。

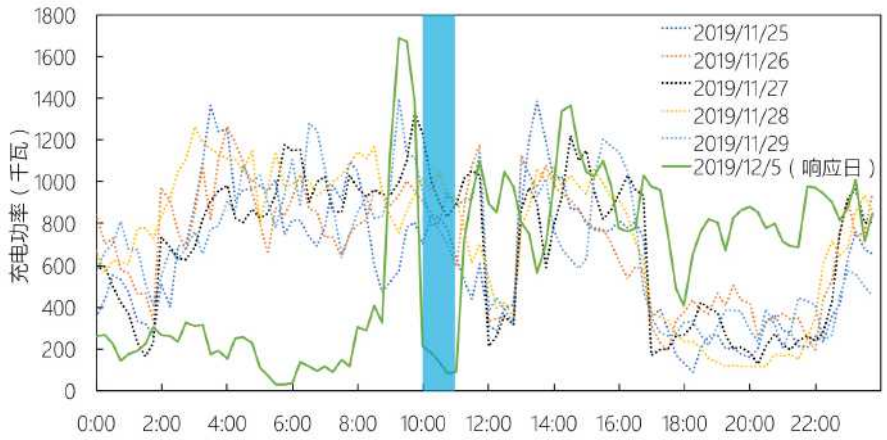


图 7　换电站响应日与平日充电负荷对比

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 小时、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 千瓦，且换电强度按时间轴平均分布，则每站最多可调用约 300 千瓦（时移 1 小时）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服务于换电服务强度变化，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 / 小时，即每站约有 2 块备用电池或 120 千瓦充电功率可实现全天候负荷时移。

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 分钟，则单位千瓦时削峰响应的补偿单价可达 6 元，远高于私人充电桩和专用充电桩价格补偿水平。表 6 为换电站参与削峰需求响应的经济性测算结果，当年均响应次数为 3 次时，单站年均收益率就达到 1500 元以上；若响应次数达到 10 次，单站年均收益率超过 5000 元。

表 6　换电站削峰需求响应经济性

主要假设			
聚合商固定投资（元）	2500	单次响应时长（小时）	1
单站充电功率（千瓦）	60-120	响应单价（元 / 千瓦时）	6
响应类型	削峰	响应速度	提前 30 分钟
响应率（%）	81.2%		
分析结果			
响应次数（次 / 年）	3	5	10
年均收益（元 / 年）	1512	2520	5040
内部收益率（%）	60%	101%	202%

图 8 基于目前试点的响应情况，对上海市三类充电设施总体所能提供的需求响应规模和收益率水平进行了比较。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 210 兆瓦，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，目前看来总体响应规模相对有限。就参与需求响应的收益水平看，以目前上海市换电网络运营强度看，换电站参与需求响应的收益率最高。虽然专用及私人充电桩收益率相对偏低，但也分别达到 21% 和 9%。

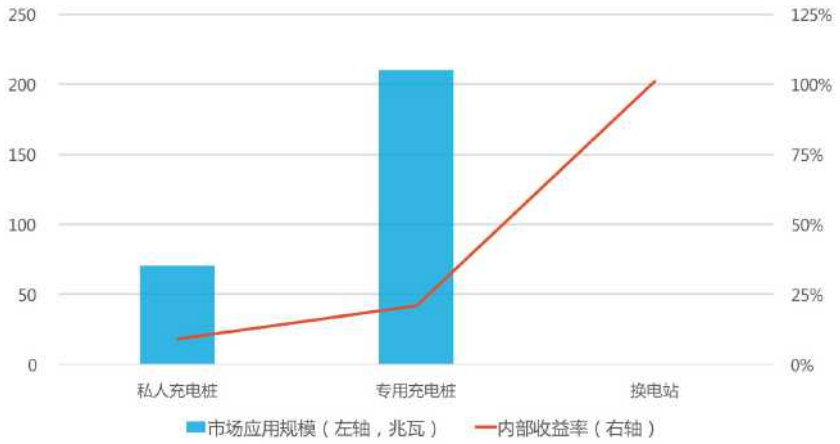


图 8　上海市三类充电设施需求响应收益率及应用规模对比

注：1. 需求响应频率为 5 次 / 年

2. 需求响应规模按当前上海市当前充电设施数量及试点响应率测算。

综上所述，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。但也要看到，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，该模式的经济性显然不足。需要注意的是，目前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，未来市场化下的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。

表 7　内部收益率对响应单价减半的敏感度对比

	私人桩		公共桩		换电站	
响应单价（元 / 千瓦时）	0.96	0.48	2.4	1.2	6	3
内部收益率（%）	9%	-2%	21%	6%	101%	50%

此外，尽管本案例中参与需求响应的车辆以纯电动车型为主，但上海市插电式混合动力车型占比较高[10]，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。

10　上海市插电式混合动力汽车约占新能源汽车累计推广量 70%。

三、试点经验

(一) 三类充电设施参与电力需求响应竞争力对比

结合试点效果与经济性分析，表 8 对三类充电设施参与电力需求响应的竞争力进行了对比。从上海市需求响应试点经验看，虽然处于统一充换电平台，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 8　试点案例三类充电设施需求响应竞争力对比

	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

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。由于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，由于参与需求响应与错峰充电的行为具有一定共性，其参与需求响应的实际效果仍需探讨。

(二) 错峰充电用户参与需求响应的潜力

电动汽车错峰充电可分为直接错峰充电和智能错峰充电两类，其中直接错峰充电指从电价低谷起始时段立即开始满功率充电直至充满，而智能错峰充电指将不同车辆的充电功率在电价低谷时段内进行先后排序，从而形成较为平缓的低谷充电曲线。图 9 为电动汽车参与需求响应与错峰充电效果叠加示意图。图中蓝色折线为目前上海市工商业峰谷电价曲线，红色曲线为上海市电网负荷曲线（夏季归一负荷），

红色柱状图分别代表典型填谷响应时段（3：00-5：00）和削峰时段（11：00-13：00）。若电动私家车一天一充，每日充电需求为 7 千瓦时，按交流充电桩 7 千瓦功率计算，每天充电时长仅 1 小时。若是住宅区夜间低谷充电，则充电起止时间为 22：00-23：00，与通常凌晨填谷需求响应时段（集中在 3：00-5：00）仍有一定距离，电动汽车进一步参与需求响应的空间仍然很大。对于办公地日间平价时段充电，则充电起止时间为 11：00-12：00，该时段与上海市目前夏季用电负荷高峰或削峰需求响应时段（集中在 11：00-13：00）具有较高重合度。因此，对于日常错峰充电的办公地充电设施而言，仍具有参与削峰响应的能力。

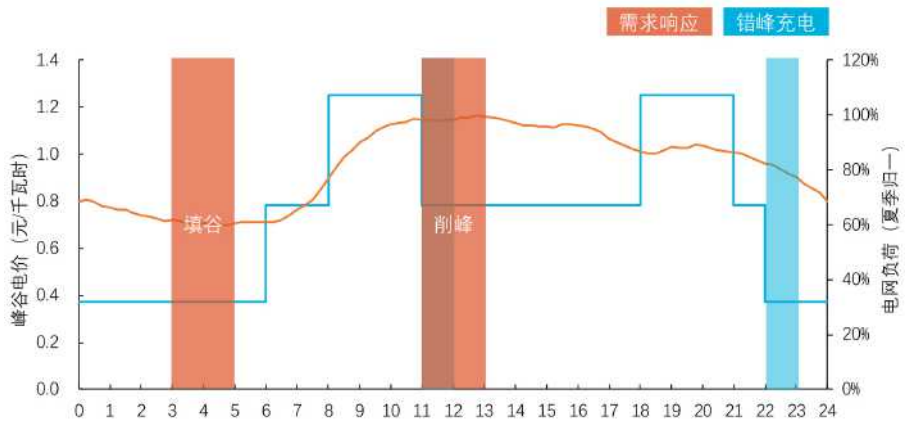


图 9　需求响应与直接错峰充电效果重合示意图

注：错峰充电：办公地（11-13 时），居住地（22-23 时）；需求响应：填谷（3-5 时），削峰（11-13 时）；峰谷电价：峰时段（8-11 时、18-21 时），平时段（6-8 时、 11-18 时、21-22 时），谷时段（22 时 - 次日 6 时）。

对于智能错峰充电桩而言，其充电负荷可在电价低谷（住宅区）或电价平段（办公地）时段进行平均分配，错峰充电行为与需求响应时间重合概率更高，但重合程度有限，即采用智能错峰充电的用户仍然有一定参与需求响应的潜力。

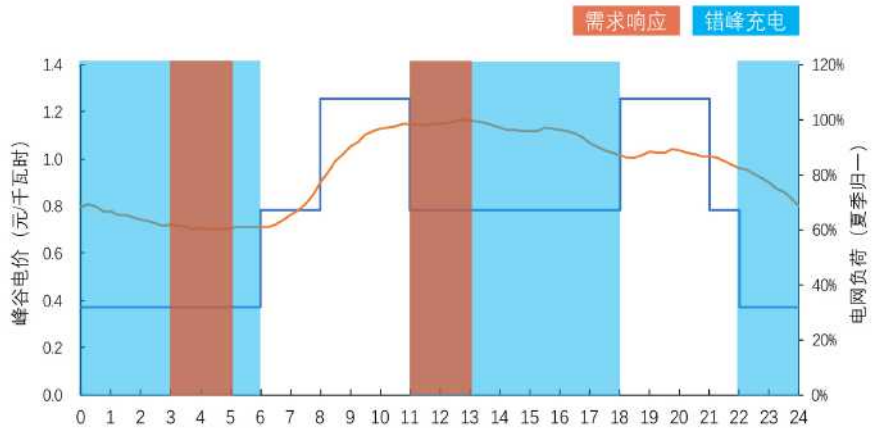


图 10　需求响应与智能错峰充电效果重合示意图

注：智能充电：办公地（11-18 时），居住地（22 时 - 次日 6 时）；需求响应：填谷（3-5 时），削峰（11-13 时）；峰谷电价：峰时段（8-11 时、18-21 时），平时段（6-8 时、11-18 时、21-22 时），谷时段（22 时 - 次日 6 时）。

因此，日常执行低谷充电的电动汽车仍然可以凭借需求响应获得额外收益。以住宅区私人充电桩为例，即使低谷充电时段（8 小时）充电负荷与填谷需求响应存在 2 小时重合，其仍有 75% 充电负荷具有填谷响应的能力，即可通过参与需求响应缩短智能充电设施投资回收期。

（三）需求响应实施方式

为提升执行效率、吸引电动汽车参与，上海需求响应试点实施中采取了积极措施，具体包括，一是充电运营商作为中间机构，提供电动汽车需求响应资源聚合管理支撑，并对各类车主进行业务指导，提高了认购、响应、结算等环节的效率；二是上海用尖峰电价的增收电费设置了需求响应补偿资金，且根据响应质量设置了不同额度的奖励标准，不过，在试点期间为吸引运营商与用电客户的积极参与，没有实施考核；三是上海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，不过，试点时期采取线下邀约形式开展，降低了准入门槛。

未来上海市大规模电动汽车参与需求响应项目的实施仍然面临一些问题：一是自动化需求响应的实施需要先进的智能化终端、通信技术等支撑，前期投入高充电运营商需承担计量设备、在线监测系统、通信网络[11]的成本，而且未来需求响应实施将提出更加灵活、快速的要求，充电运营商还需进一步承担设施的改造、平台的升级成本。目前激励主要面向参与需求响应的用户，而面向运营商软硬件设施的补

贴待健全[12,13]；二是响应量预测技术和动态调度能力待提升。目前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，因此并没有太多的实测数据用于负荷响应特性研究，难以准确地刻画电动汽车响应行为[14]，而运营商也尚未建立实时有效的动态调节能力。同时，许多充电设施未报装响应负荷核定存在难度；三是目前电动汽车参与需求响应的试点大多依赖于半行政化的手段才能够顺利开展，尚未建立起市场化的商业模式。补偿标准的高低，会影响参与的积极性及质量，而电动汽车车主、充电运营商、电力公司之间收益分享机制尚不明确[15]。

11 祖向荣 , 白焰 , 阳建坤 . 基于复杂事件处理的用户需求响应性能实施监测分析 . 电网技术 , 2016, 40(10): 3220-3227.

12 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 . 电力需求侧管理 , 2009, 11(2): 73-76.

13 张赢 , 董立军 , 黄雯 . 国内电力需求响应发展障碍分析及展望 . 电气技术 , 2017(7): 1-5.

14 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 . 2019,43(2): 694-704.

15 黄甜 . 面向智能电网的电力需求响应商业运作模式研究 . 南京：东南大学 , 2016.

第四章 国际经验对比

在国外已有不少案例，推动电动汽车作为电力系统的灵活性资源。不同地区的案例实施模式和规模有所不同。一般而言，V1G（能量只能是电网流向汽车，但是充电功率可调）通过柔性控制，有效的提高电网运行效率。V2G 或者 V2X 指车与网或车与 X 能量可双向流动。V1G 的技术要求以及商业模式相对简单，已有不少成功案例，但可持续的商业模式以及用户参与度仍然是要解决的问题。 相比而言，V2G 的发展需要进一步技术突破以及市场机制的支撑。V2G 在国外也是在探索过程，目前还没有规模化、商业化的成功案例。国内已有 V1G 及 V2G 的案例，但国外案例与国内最大不同在于市场机制发挥的作用。在市场机制下，电动汽车为电力系统提供资源的时候，定价过程比较透明，有助于利益相关方做出有依据的选择。

技术突破和市场机制的建设以外，用户侧也是关键因素之一。为回答如何把电动汽车的充电负荷有效地利用并管理，哪些类型电动汽车具备条件作为电网资源等问题，需要分析透些关键因素，如运行强度、充电行为、对充电电价敏感度等。这些因素随着时间、地区和环境的变化，还会不停的变化。

充电设施的发展是车网之间互动不可缺少的基础。如像美国较多的独栋楼住宅私人充电桩比较容易调动参与，但公共充电基础设施，尤其是快速充电基础设施发展存在不确定性，其利用场景预测比较困难。

一、 基于电力公司分时电价

V1G 最简单的模式是通过分时电价，鼓励电动汽车车主避开高峰时段进行充电。峰谷电价差价较大的情况下，分时电价可为车主提供足够的动力调整充电安排。 美国加州电力公司 PG&E 为住宅私人桩用户提供两种电动汽车充电分时电价计划，两种分时电价都不是阶梯电价，但其中一种（EV-B）需要安装电动汽车充电专用的电表，以把其他家用用电和电动汽车充电用电区分开。图 11 可看到 PG&E 提供的两种充电分时电价在一天中的变化，用户按照自己的充电习惯以及条件选择合适的电价计划。比如，用户能保证每天在晚上 11 点至早上 7 点之间能满足所有充电需求，并能安装电动汽车单独电表，EV-B 对该用户比较合适。

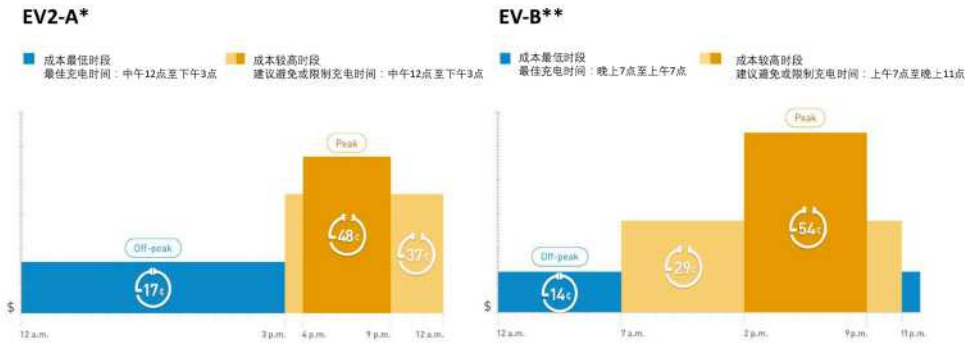


图 11　美国加州 PG&E 电力公司的电动汽车充电分时电价

* 高峰时段（下午 4 点至 9 点）、准高峰时段（下午 3 点至 4 点、下午 9 点至 12 点）、其他时间为非高峰时段。

** 周末和节假日只有一个高峰时段（下午 3 点至 7 点），其他时间为非高峰时段。

来源：PE&E 网站 [16]

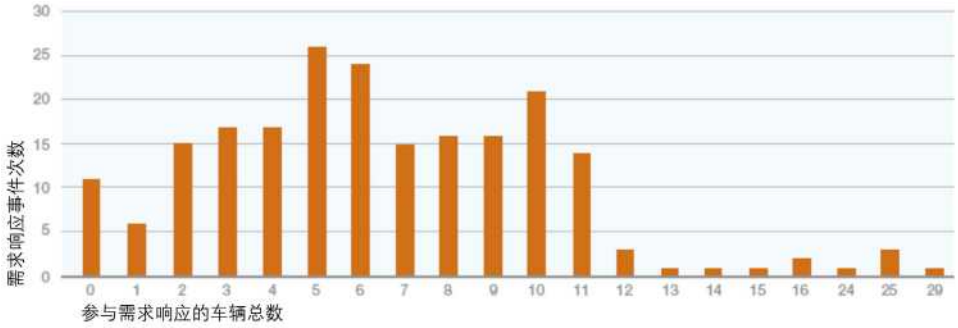
（单位：¢ /kWh、夏季电价）

分时电价具有引导用户的作用，为把松散的电动汽车充电负荷更有效地管理，电力公司与负荷集成商合作，把电动汽车纳入到需求响应资源。上海市试点工作也是类似于此模式。电动汽车参与电力公司的需求响应案例中，具有代表性的包括 PG&E 和宝马公司合作的 iChargeForward 项目，共有 100 位宝马 i3 车主参加了该项目。 PG&E 发起需求响应信号的时候，宝马公司需要完成时长一小时、100 千瓦的削峰负荷。项目完成要求为降低负荷量超过 90%（90 千瓦）。 2015 年 7 月至 2016 年 12 月 PG&E 进行了平均一周四次（共有 209 次）的需求响应活动，宝马公司成功完成了 90%（189 次）。

参加 iChargeForward 的 100 个用户中大约 60% 已参加上述的 PG&E 分时电价计划，对充电时间调整有一定的意识。参加 iChargeForward 的需求响应项目，用户不仅错峰充电节省电费，还可以获得经济回报。用户可选择参加日前（提前 24 小时通知）或者实时需求响应项目（4 分钟响应时间）。每次需求响应活动，用户可自愿选择是否参加。参与度最高的一次 29 个用户参加了其活动，通常 5-6 个用户参与的较多，尤其是夏季需求响应频率较高的时候，很多用户感到压力，选择性参加。考虑到共有 100 个用户报名参加 iChargeForward, 平均参与度不算很高，约 80% 的负荷削减来自电动汽车电池梯次利用储能。整体项目结果很成功，但在提高用户参与度方面仍然存在较大的困难 [17] 。

16 https://www.pge.com/en_US/residential/rate-plans/rate-plan-options/electric-vehicle-base-plan/electric-vehicle-base-plan.page

17 BMW iChargeForward: PG&E’s Electric Vehicle Smart Charging Pilot, https://www.pgecurrents.com/wp-content/uploads/2017/06/PGE-BMW-iChargeForward-Final-Report.pdf



来源：BMW iChargeForward: PG&E’s Electric Vehicle Smart Charging Pilot

图 12 iChargeForward 用户参与度

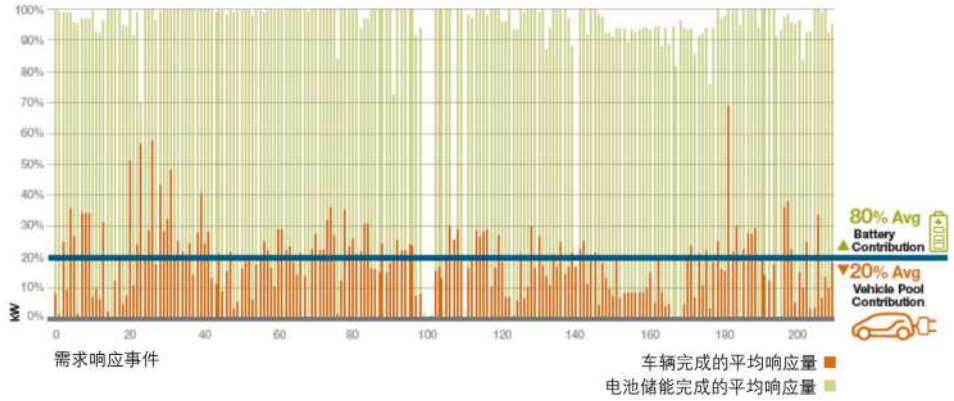


图 13 在 iChargeForward 电动汽车与电池梯次利用贡献对比

该项目第二期，iChargeForward，增加了更多内容，如更多车型用户（5 款宝马电动汽车、250 个用户）、新能源消纳等。为了鼓励用户参与，活动奖励金分三次发放，在第二期项目周期，每个用户获得的总额可达 900 美金。奖励金额度按照参与次数、是否活动中间退出等的因素确定 [18]。第二期项目原定 2018 年截止，但后来延迟到 2019 年。iChargeForward 也不完全是商业化模式，该试点工作获得了加州能源委员会的资金赞助，宝马公司作为负荷集成商没有获得盈利。接下来的工作重点包括把电动汽车作为电网资源的价值的依据梳理清楚，建立可行的商业模式，所有参与方获得应得的经济回报 [19]。

18 https://www.bmwiChargeForward.com/#/home
19 https://www.greentechmedia.com/articles/read/bmw-optimizing-ev-charging-renewable-energy

PG&E 以外，多数美国电力公司也为电动汽车用户提供分时电价计划。圣地亚哥电力公司提供的 EV 分时电价也与 PG&E 相似。康涅狄格州也推出了电动汽车专用充电电价（Plug My Ride），以鼓励电动汽车用户在非高峰时段进行充电 [20]。

二、 电力市场与需求响应相结合

加州另一个案例是日产公司与 Enel X 合作的 SmartCharge 项目，其实施模式与上述的 iChargeForward 有所不同。Enel X 的子公司 eMotorWerks 为日产公司提供软件平台和服务，直接与加州独立系统运营机构（CAISO）对接。参加 SmartCharge 项目的日产 Fit 用户允许 eMotorWerks 云对云通讯，实时操作，把 CASIO 实时电价信号推送给用户提供参考。此后，用户选择是否参加需求响应活动。成功完成五次参与活动的用户可获得第一笔奖励，之后每两个月发放一次 [21]。

另一种模式 Enel X 与 CAISO 合作实施的虚拟电厂项目。Enel X 把居民私人桩用户打包成一个虚拟电厂，每日参加电力现货市场竞价。 此项目在 2017 年第四季度启动，实现了电动汽车作为全自动需求响应资源。参加此项目用户的充电桩必须安装 Enel X 的 JuiceNet 软件，同意受其控制，并获得充电积分（JuicePoints）。 此项目已成功运行两年多，2019 年 6 月至 9 月四个月时间内，CAISO 发出了 11,000 次需求响应信号，Enel X 共参加了超过 24000 桩·次。

图 14 显示美国南加州的案例，按照日前竞价进行需求响应，可以看出有效地把部分电力需求从电价最高的时段移到电价较低的时段。



来源：SCE

图 14 美国南加 z 州爱迪生电力公司西部地区日前竞价与需求响应

20 https://www.utilitydive.com/news/if-you-build-it-will-they-charge-utilities-cautious-in-plans-to-spur-elec/423982/

21 https://csr.honda.com/2018/07/31/honda-smartcharge-beta-program-helps-electric-vehicle-drivers/

三、 车网互联（V2G）

2018 年发布的报告《V2G Global Roadmap》[22] 梳理了全球 50 个 V2G 项目的成果以及发展趋势，其中 25 个项目在欧洲，18 个项目在北美洲，7 个项目在亚洲。大部分的项目重点放在技术层面（98%），过去十多年的经验证明了 V2G 的技术可行性，但可持续的商业模式以及社会层面的问题还待解决。

该报告精挑细选 10 个标志性项目，提供了详细介绍。

表 9 全球十大 V2G 项目

项目	国家	年份	特点
Parker	丹麦	2016	世界首个完全商业化 V2G 中心
Redispatch V2G	德国	2018	通过 V2G 消纳可再生能源虚拟模式
City-zen Smart City	芬兰	2014	开拓性地拓展了配电系统运营服务
Smart Solar Charging	荷兰	2014	首创交流 V2G 项目
Grid Motion	法国	2017	提供最前沿的客户洞察
Korean V2G	韩国	2014	为韩国推出电动汽车做准备
M-tech Labo	日本	2012	开创性的车辆到建筑 (V2H) 模式
JUMPSmart MAUI	美国	2012	V2G 和 V2H 通过毛伊岛上的八十多个充电桩连接
INVENT	美国	2017-2020	50 个用于 EMS 的创新型充电设备
Network Impact	英国	2018	配电系统运营机构主导的 V2G 对电网影响的研究

- **Parker （2016-2018）：**丹麦调频市场 V2G 商业化发展的标志性项目，覆盖了多个车队、车辆和区域。该项目旨在测试车队提供电网服务的能力，解决商业化的障碍，比较了不同车型的性能。
  - 项目价值：14,731,471 丹麦克朗（ForskEL 出资）。
  - 主要参与方：DTU Elektro/PowerLabDK（项目负责人），NUVVE（集成商），日产，PSA 集团，三菱汽车（汽车 OEMs）， Insero（其他），Frederiksberg Forsyning（车队），Enel（充电桩），三菱公司（技术）。

22 V2G Global Roadtrip, Everoze and EVConsult, http://everoze.com/app/uploads/2018/10/UKPN001-S-01-H-V2G-global-review-compressed.pdf

- 50 台 Enel 的 10 千瓦直流充电桩、日产 LEAF 20 千瓦时、日产 E-NV200 24 千瓦时、三菱 Outlander 12 千瓦时车型参与此项目。
- 实用 V2G CHAdeMO 通讯协议。
- 荷电状态（SoC）为 30% 至 95%。
- 商业层面取得很大成功，但也发现了技术层面的些问题，如 i）提供长期的调频服务，会超过电池容量，需要更低功率的竞价方式；ii）双向能量损耗；iii）电池退化影响。

表 10 Parker 项目服务

服务对象	输电系统运营商（TSO）	配电系统运营商（DSO）	第三方中介（TPI）（参与能源市场）
服务	频率限制	限制管理	当日交易
是否应用 V2G	是	是	是
触发时点	事前	事后	差价
触发机制	电网频率	后台信号控制	接受的报价（bid/offer）
响应速度	小于 10 秒	3-5 分钟	小于 15 分钟
服务时长	最长 30 分钟	1-4 小时	15 分钟
状态	经过实证	研究中	研究中

- **Redispatch V2G（2018-2020）：**通过 V2G 实现虚拟可再生能源消纳，减少输电约束和减缓电网投资。作为技术示范项目，使用输电系统运营商自己的服务车队参与此项目。
  - 主要参与方：TenneT（TSO）/The Mobility House（EMS）/ 日产（OEM）。
  - EVTEC 充电桩参与南部为 10 千瓦直流 V2G，北部 7.6 千瓦 V1G 项目。
  - 日产 LEAF、日产 E-NV200 40 千瓦时 10 辆车辆参与。
  - 日产汽车允许将荷电状态（SoC）降至 35%。
  - 该项目的重点为测试在不同输电约束情景下 V2G 的响应能力。

表 11 Redispatch 项目服务

服务对象	TSO
服务	TSO 限制管理
是否应用 V2G	V2G （北方地区 V1G）
触发时点	事前
触发机制	TSO 控制信号
响应速度	几秒到两分钟
服务时长	几小时到 2-3 天
状态	测试中

- City-zen（2014-2019）：针对配电系统运营商服务的小规模商业实验，吸引不同类客户群：商业、个人和共享汽车。尤其是采用了商业、社会和技术层面都全面考虑的方法，提供了多个在电力部门的用例。
  - 4 台直流 V2G 充电桩（MagnumCap），10 千瓦。
  - 2 台三菱 Outlander、2 台日产 EV200（mini-an）、1 台日产 Leaf 车辆参与。
  - 商业用户积极参与，部分原因是领导层面重视绿色证书以及应急能力。
  - 用户可获得每小时 10 欧分（有公共资金补贴）。
  - 最大的挑战为可调度性以及荷电状态不理想的情况。因为项目规模很小，尤其是很难保证用户侧足够的响应能力。

表 12 City-zen 项目服务

服务对象	DSO	TPI
服务	限制管理与能源质量	非均衡与能源交易
是否应用 V2G	是	是
触发时点	事前	价差很大时
触发机制	USEF 平台预测	在市场高峰 / 低谷期间
响应速度	几分钟 / 几小时	结算周期 -15 分钟
服务时长	几分钟 / 几小时	几分钟 / 几小时
状态	测试中	测试中

- Smart Solar Charging （2014-2019）：首创交流 V2G 项目，22 个充电桩安装在 Lombok 附近的城市汽车共享计划和太阳能项目中。本项目的重点是开发 V2G

的交流标准，开发一个系统促进充电设施和太阳能的推广。

- 主要目标为共享汽车市场，22 台雷诺 Zoe（40 千瓦时）。
- Seers Group 和 People Group 提供的 22 千瓦交流公共充电桩，直接与低压电网并网，帮助就地消纳太阳能。

表 13 Smart Solar Charging 项目服务

服务对象	DSO	TSO	TPI（主要）
服务	限制管理	调频	非均衡与能源交易
是否应用 V2G	是	是	是
触发时点	事前	事前	差价较高时
触发机制	USEF 平台预测	USEF 平台预测	市场峰 / 谷期
响应速度	几分钟到几小时	几分钟到几小时	解决周期在 15 分钟
服务时长	几分钟到几小时	几分钟到几小时	几分钟到几小时
状态	研究中	研究中	研究中

虽然 V2G 的技术可行性已被证明，但车端和充电桩硬件技术还未成熟，V2G 功能的充电桩成本昂贵（大约 V1G 桩的 5 倍），并市场上没有太多具有 V2G 功能的电动汽车。为实现更好的商业化，减少充电设施硬件成本、车辆款型多样化仍然是基本必要条件。

V2G 在不同市场条件和政策，提供不同服务的时候，能实现的价值天壤之别。据 Enel 公司的分析，Enel 在丹麦合作的 V2G 项目可带来的经济效益最高可达每辆电动汽车每月 1,345 欧元。

四、 国际案例经验总结

国际案例实施模式是否可持续，最主要的因素为市场机制是否透明运作，定价是否有依据。不管电力公司执行的分时电价，或者电力现货市场的价格，都是市场行为所决定的。资源的价值按供需平衡实况波动，卖方及买方都有动力调整行为获得经济效益。对电力公司而言，需要通过降低高峰需求减少供电成本，而对电动汽车用户，通过调整充电行为获得经济补偿，或者感受到参与低碳减排活动中。项目设计必须清晰，电动汽车作为电网资源到底具有什么样的价值，不同相关方之间如何分摊成本以及分享效益。

第五章 政策建议

推动电动汽车与电网互动对我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。应确立电动汽车移动储能资源的市场地位，明确电动汽车参与电力市场的准入条件，适度降低电动汽车参与市场的门槛，实现应用场景多样化[14]。鼓励实施主体由电网公司主导实施向多主体实施发展，培育充电运营商调度能力，利用平台大数据，挖掘私人充电桩车网互动的潜力，拓展智能用电、节能管理、设备运维等增值服务[13,14]，提升电动汽车调控规模、可靠性、稳定性。

其次，应设计合理的激励政策，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电动汽车参与需求响应，充分发挥降低配电网投资的价值，扩充需求响应专项资金来源，并创新非资金补贴奖励[23]。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、充电运营商等各方收益分享方式，并为参与 V2G 的车辆设计提供合适的电池质保、保险产品。中长期，随着电力改革的不断深化，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。

同时，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。完善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、自动化、智能化开展。对计量设备、平台研发与建设、公共网络租赁，给予财政资金支持[24]。完善电动汽车参与需求响应的终端、系统、通讯网络、安全规范等方面标准体系，推动信息交互规范化，保障设备与系统间的良好互操作性。

23 吴鹏 . 实施电力需求响应意义重大 . 20160823. 中国电力报 . http://www.cec.org.cn/xinwenpingxi/2016-08-23/157379.html

24 龚峰 . 电改背景下的需求响应及电价发展趋势 . 智见能源 . 20180413. http://www.solarpwr.cn/bencandy-61-36652.html

第六章 下一步工作方向

目前需求响应各类应用场景开展试点比较有限，导致基于实际试点效果开展的商业模式及价值评估研究较少。下一步需要基于更广泛的试点经验，梳理各场景下电动汽车响应资源的价值，并探讨可持续的商业模式。价值和商业模式的分析将为决策者以及各参与方提供依据，逐步地建立市场机制。

高质量的需求响应才能更好的保障电网的稳定运行，并帮助提高系统运行效率。得不到用户参与，再好的政策及市场机制也是徒劳无益。下一步工作的重要内容包括用户侧工作。针对用户侧的工作分两个部分：一是，目前国内已有电动汽车负荷响应特性研究仍较为薄弱，且缺乏实际应用。因此，有必要开展用户的负荷特性研究，考虑用户对电价或控制信号的响应特性、用户意愿等因素，建立准确的响应量预测模型，提高需求响应的准确性和成功率。二是，研究机构、电动汽车车企、充电运营商、电力公司等企业相互密切合作，设计一系列实用、可操作的用户参与策略，以确保用户对电动汽车作为电网灵活性资源的价值有充分了解，并提供参与项目的机会。

附件 1：

上海市 2019 年需求侧响应补偿计算方式

需求响应补偿计算方式：

$$A_{_year} = P \times k_4 \times \sum_{i=1}^{n} Q_i k_i$$

其中，

Q_i——用户单次受邀响应量（kW）

P——统一出清价格（元 /kW）

n——需求侧响应年度发布次数

单次响应系数 ki

$$k_i = k_{1_i} \times k_{2_i} \times k_{3_i}$$

其中，

k_1 响应量系数：取 1

k_2 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 响应活动时长：私人桩取 3，专用桩取 2，换电站取 1

k_4 响应参与度系数：取 1

附件 2：

需求响应经济性计算方法

(1) 内部收益率

内部收益率代表资金流入现值总额与资金流出现值总额相等，即净现值等于零时的折现率（如下式）。一般情况下，内部收益率大于等于基准收益率（如 8%）时，可认为项目可行。

$$\mathrm{NPV}=\sum_{t=1}^{T}\frac{CF_t}{(1+IRR)^t}-C_0=0$$

其中：

NPV：项目净现值，元；

CF_t：项目 t 年净现金流，元；

IRR：项目内部收益率，%；

C_o：项目初期投资成本，元；

T：项目运行周期，年。

(2) 需求响应经济性

$$CF_{t,sc}=R_{dr}-C_{dr}$$

$$R_{DR}=f\times p_{dr}\times P_{EV}\times(1-\alpha)$$

其中：

$CF_{t,sc}$：参与需求响应第 t 年净现金流，元；

R_{dr}：每年需求响应收益，元；

C_{dr}：每年需求响应运维成本，元；

f：每年电动汽车参与需求响应频次；

p_{dr}：需求响应补偿单价，元 /kW/ 次；

P_{EV}：电动汽车充电功率，kW；

α：需求响应组织方收益分成，%。

再生纸印刷

联系我们

自然资源保护协会（NRDC）
中国北京市朝阳区东三环北路 38 号泰康金融大厦 1706
邮编：100026
电话：＋ 86-10-5927 0688
www.nrdc.cn