

# 电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究

2016年9月

## 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



# 致谢

此报告由国家发改委能源研究所、国家可再生能源中心、自然资源保护协会合作撰写。上海市经济和信息化委员会、上海市发展和改革委员会、上海合煌能源科技有限公司、宝马（中国）服务有限公司、上汽安悦充电科技有限公司、上海市新能源汽车数据采集与监测研究中心、上海市电力公司对本报告研究提供了数据及信息支持，在此表示感谢。特别感谢上海电器科学研究所阮於东教授、交通大学韩延民教授、美国三益公司（Energy & Environmental Economics）Frederich Kahrl 先生、上海腾天节能技术有限公司张皓先生、自然资源保护协会的 Roland Hwang 先生、Vignesh Gowrishankar 先生和 Christina Swanson 博士对报告进行审阅并提出宝贵意见和建议。

## 课题组

刘 坚 | 国家发改委能源研究所、国家可再生能源中心

金亨美 | 自然资源保护协会

唐 莉 | 上海合煌能源科技有限公司

## 自然资源保护协会 项目组

游梦娜 李玉琦 刘明明 周晓竺 高天健

秦思妍 米思易 雷泽诺 罗千真

感谢 ClimateWorks Foundation 对本研究的资金支持。

# 电动汽车在上海市电力系统中的应用潜力研究

# 目录

<b>1 总结摘要</b>	<b>1</b>	<b>5 电力市场及运营模式建议</b>	<b>31</b>
<b>2 电动汽车发展背景</b>	<b>4</b>	5.1 电力体制改革与电动汽车	31
2.1 电动汽车发展对电力系统的影响	4	5.2 电动汽车商业运营模式对比	33
2.2 电动汽车技术分类	6	5.3 充电价格体系及其问题	34
2.3 电动汽车与电力需求响应	8	<b>6 研究总结 / 进一步研究建议</b>	<b>35</b>
<b>3 电动汽车充电负荷对上海市电网的影响</b>	<b>9</b>	6.1 加强有序充（放）电技术研究	35
3.1 电动汽车数量规模	10	6.2 实施聚合式充电负荷调控	36
3.2 充电基础设施	11	6.3 建立反映灵活性资源价值的市场环境	36
3.3 上海市电力发展趋势	12	6.4 加快住宅及办公地点充电设施建设	36
3.4 电动汽车充电量需求	15	6.5 研究制定充电价格体系	37
3.5 电动汽车充电负荷特性	17	6.6 研究局限与展望	37
3.6 电动汽车充电对输配电网的影响	19	<b>附件</b>	<b>38</b>
<b>4 上海市电动汽车参与需求响应的潜力及经济性分析</b>	<b>21</b>		
4.1 上海市需求响应现状	21		
4.2 电动汽车参与需求响应的潜力	22		
4.3 电动汽车参与需求响应的经济、环境效益	25		
4.4 电动汽车 V2G	28		
4.5 上海宝马互联驾驶研究院电动汽车储能项目	30		

## 图目录

图 2-1 2006-2016 中国电动汽车销量及市场占比	5
图 3-1 上海市新能源车数量规划规模	10
图 3-2 2015 年上海市冬、夏典型日负荷曲线	12
图 3-3 2015 年上海电力能源结构细分情况	13
图 3-4 2020 年上海电网全社会用电量水平估计	13
图 3-5 2020 年上海电网最高用电负荷水平估计	14
图 3-6 两种情景下上海市 2020-2030 年电动汽车销量及保有量	16
图 3-7 电动汽车充电负荷影响因素	17
图 3-8 上海市各类乘用车充电时间概率分布	17
图 3-9 两种情景下 2030 年上海市夏季电动汽车充电负荷	18
图 4-1 上海市电动私家车、公务车停车及充电时间概率分布	22
图 4-2 两种情景下电动汽车有序充电调节效果	24
图 4-3 两种电动汽车发展情景私家车 / 公务车随机及有序充电负荷	24
图 4-4 电动汽车参与需求响应经济性分析	25
图 4-5 传统需求响应资源与电动汽车有序充电响应成本示意图	26
图 4-6 电动汽车 V2G 成本下降潜力	29
图 4-7 上海宝马互联驾驶研究院电动汽车及储能项目框架示意图	30

## 表目录

表 2-1 国内典型插电式混合动力汽车关键参数	7
表 2-2 国内典型纯电动汽车关键参数	8
表 3-1 电动汽车充电模式	11
表 4-1 2030 年电动汽车需求响应下电网负荷	23
表 4-2 三类电价情景下电动汽车充电调节效益	27
表 5-1 国内典型电动汽车充电桩功率及价格	34

# 1 总结摘要

发展电动汽车是道路交通部门节能减排的关键途径，也是推动我国产业结构转型的重要动力。国家从科研投入、产业扶持、法规标准、推广应用等角度制定了一大批电动汽车发展扶持政策，并多次明确 2020 年纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销量达到 500 万辆的发展目标。受政策推动，近年来我国电动汽车市场快速增长，2015 年中国电动汽车销量超过 33 万辆，在汽车市场中占比达 1.34%，成为全球最大的电动汽车销量市场。

电动汽车的普及将对电力系统运行带来多个层面的影响。首先，作为新型用电方式，电动汽车数量的提升势必增加用电量需求，特别是大量电动汽车集中在电网负荷高峰时段充电将显著增加电网负荷峰值，从而对系统容量及安全稳定运行提出更高要求；另一方面，若采取有序管理或双向互动方式，电动汽车也可被视为系统需求响应乃至分布式储能资源。因此，大规模电动汽车的接入不仅可以降低新建电力基础设施规模，还可带来调峰、辅助服务等多种系统应用价值。

然而，目前国内对电动汽车在电力系统中的应用潜力研究仍然不足，对大规模电动汽车接入电网后的负荷调节潜力及经济性缺乏定量分析。因此，本研究以上海市为研究对象，在电动汽车发展预测的基础上，评估了电动汽车充电负荷对上海市电网的影响，并根据上海市电力系统调峰需求与电动汽车用户出行特点，分别从电动汽车充电需求及负荷特性、电动汽车充放电调节潜力及经济性等方面进行了分析：

本研究针对上海市电动汽车发展设定了两种情景，即：常规发展情景下，到 2030 年电动汽车年销量占全部汽车销量市场的 28%，电动汽车保有量达到 155 万；高速发展情景下，到 2030 年电动汽车销量占全部汽车销量市场的 43%，电动汽车保有量达到 245 万辆。充电量方面，在常规发展情境下，2030 年上海市电动汽车充电量需求约为 12.4TWh，占当年全市用电量的 7.4%；在高速发展情景下，全年充电量需求约为 19.6TWh，占当年全市用电量的 11.2%。负荷特性方面，本研究基于上海市电动汽车数量增速预测及电动汽车用户出行行为调研，测算了电动汽车充电负荷曲线。结果显示，在随机充电情况下，电动汽车充电负荷将显著提升傍晚电力负荷高峰，且全天峰谷差也将有所增加，从而对电网安全稳定运行造成一定压力。

相比传统需求侧调节资源，电动汽车具有较强的充放电调节能力，特别当电动汽车技术得到普及时，电动汽车可能成为系统最重要的调节资源之一。因此，有序调节电动汽车充电负荷不仅可以降低电动汽车大规模接入对电网安全稳定运行带来的负面影响，还能提升系统灵活性。由于不同车型的出行特征及车型参数有明显差异，因此为深入分析上海地区电动汽车行为特征，本研究分别对当地电动公交车、电动出租车、电动私家车、电动公务车、电动物流车等五类车型用户的有序充电潜力进行了分析。研究显示，在只考虑电动私家车、电动公务车两类车型的灵活性调节潜力的情况下，采取有序充电之后，电网高峰负荷有一定程度降低，负荷峰谷差明显减小，且大部分充电负荷转移至凌晨负荷低谷时段。

## 充电需求及负荷特性

## 充电负荷调节潜力

## 充电调节经济性

电动汽车充电与传统需求响应资源存在很大差异。对于电动汽车而言，充电需求与出行需求在时间上是分离的，在车辆停驶时段内对电动汽车充电时间的调整并不会明显影响用户的出行行为，因此其需求响应的成本相比传统需求响应资源显著降低。本研究基于国外电动汽车充电价格弹性的研究成果，分析在上海市采用分时充电电价引导充电行为的效果。研究发现，在有序充电技术成熟的前提下，现行上海市居民分时电价将对电动汽车用户的充电行为有明显的影响，即 70% 以上私家及公务车用户将在负荷低谷时段进行充电。对于电网企业而言，加大电动汽车充电峰谷电价差对降低上海市电网夏季高峰负荷有一定作用；相比之下，考虑到可再生能源发电的渗透率将不断提升，电动汽车充电的“填谷”的价值更为明显。对于电动汽车 V2G<sup>1</sup> 而言，由于电池技术仍不成熟，市场环境亦不完善，经济效益仍然偏低。但从长远来看，随着电动汽车产业化加速，规模生产下电池成本有望显著下降，届时电动汽车与电网互动不仅能够带来可观的经济效益，还可实现巨大的社会和环境效益。

通过上述分析可见，随着电动汽车数量的日益提升，对充电负荷进行有序引导不仅能够降低大规模电动汽车接入对电网带来的负面影响，还可使其成为电力系统重要的调节资源。而如何充分释放电动汽车在电力系统中的应用潜力，取决于电力市场环境、有序充电技术、车辆商业运营模式（车辆共享、分时租赁等）、充电基础设施、充电价格体系等因素：

## 电力市场环境

我国现行的电力市场机制对电动汽车的充电引导显然不足。首先，电力计划调度无法体现系统灵活性资源的市场价值，有必要结合电力体制改革方向，在建立竞争性的电力现货市场以取代目前我国现行的计划调度方式的同时，研究制定反映电动汽车等灵活性调节资源系统价值的市场机制。例如建立以分时段电量交易的集中竞价现货市场，并适当降低电动汽车参与电量与辅助服务市场的准入门槛。随着我国电力体制改革的深入和新型售电主体的形成，竞争性批发市场势必将不同时段形成的差异化市场价格传导至售电侧，各售电主体可通过负荷灵活调节技术实现对不同时段电能价值差异的套利，从而激励售电商和需求响应提供商采用电动汽车等高质量灵活调节资源。

## 有序充电技术

目前已建和在建充电设施的监控系统对有序充电的支持水平参差不齐，导致绝大多数电动汽车仍采取“即插即充”的充电模式。随着电动汽车的规模化应用，电动汽车有望作为分布式移动储能单元在能源互联网中发挥重要作用。研究有序充放电技术，可以有效利用电动汽车储能特性，平抑电网负荷峰谷波动，提高电网接纳间歇性可再生能源的能力和运行效率。因此，电网企业、电动汽车及充电设施制造商应协同研究电动汽车有序充（放）电技术，将充电网络作为配电网、车联网的有机组成部分，综合考虑充电设施和电网的规划、设计、建设和运营，推动电动汽车充电设施与电网协调发展。

## 商业运行模式

电动汽车充电具有明显的分散、随机、不确定的特点，大量分散的电动汽车随机充电负荷难以被精确预测和调度，也降低了其电力系统应用价值。引入充电服务商一方面可通过充电运营平台等信息化手段提高电动汽车充电负荷预测精度，一方面也可通过车联网等技术对电动汽车充电行为进行合理引导，从而大幅提升电动汽车作为负荷侧灵活性调节资源接入系统的置信度。但在具体实践中，如何实现负荷集成却仍面临众多挑战。例如：通过什么样的策略和机制能够吸引足够的电动汽车参与集成，并

保证车辆与电网的稳定和较长时间连接；聚集车辆在地理位置呈现何种分布，如何有效监测和控制运行信息；如何追踪每辆车内每块电池荷电状态（SOC）以及如何建立包含充电服务商的新型电力市场体制机制。这些问题都需要较长的探索过程。

## 充电基础设施

充电设施是电动汽车与电网之间的衔接点，是决定电动汽车有序接入的关键因素。电动汽车的充电模式主要包括慢速充电、常规充电、快速充电、电池更换及无线充电，各种充电模式的发展也受到相应资源的限制，例如快速充电设施大规模建设受到电网容量和基础设施成本的限制；家庭充电桩受到固定停车位数量的限制；公共充电受到停车时间短的限制。因此，未来电动汽车充电难以单纯依赖某一种充电模式，需要实现多种充电模式在不同场景间的互补。本研究发现，从提升电动汽车充电灵活性的角度而言，应优先建设住宅及办公地点充电设施，与此同时，应加快建设定时充电、智能充电软硬件设施，为电动汽车用户参与负荷调控营造便利条件。

## 充电价格体系

上海市现行电动汽车充电价格机制仍存在容量电价、电量电价和充电服务费三方面问题。例如，政府已明确要求电动汽车充电价格应参照充电设施所在场所分时 / 峰谷电价执行，但现实操作中，不论是住宅、办公地点专用充电还是公共停车场充电，充电费用往往依据充电电量收取，固定电价难以有效激励错峰充电行为；其次，目前电动汽车充电免收容量电费，而单一的分时电价难以充分反映用户的容量成本，特别是对于住宅和办公地点配建的专用充电设施，其负载率相比其他用电负荷设备更低，在满足相同电量服务的前提下，电动汽车因此承担了较少容量成本，也不利于平抑集中充电下的尖峰负荷；电能费用方面，现行住宅分时电价对电动汽车充电行为具有一定有序引导作用，但也可能引发新的负荷高峰，且预设的固定分时电价也难以充分发掘灵活性资源的实时调节价值；充电服务费方面，现行的充电服务费执行单一价格上限，但目前交、直流充电设施成本差距巨大，单一价格机制显然无法形成对快速充电设施建设的有效激励，也不利于无线充电等新兴技术的产业化。因此，电动汽车充电价格机制设计应对容量电费、电能电费及充电服务费进行综合考虑，最终的充电价格既要保持电动汽车相对于燃油汽车的燃料成本优势，弥补充电基础设施的初期投资，又要通过价格信号引导电网友好的充电行为，从而有效激发电动汽车用户参与系统服务，充分发掘电动汽车在电力系统中的应用潜力。

<sup>1</sup> V2G 是 Vehicle-to-grid（车辆到电网）的缩写。V2G 描述了电动汽车与电网的关系，即当电动汽车不使用时，车载电池的电能销售给电网的系统；若车载电池需要充电，电流则由电网流向车辆。目前包括美国特拉华大学、太平洋天然气和电气公司（PG&E）、Xcel 能源公司、国家可再生能源实验室（NREL）和英国的华威大学等研究机构都在持续进行 V2G 技术的研发与示范。

## 2 电动汽车发展背景

### 2.1 电动汽车发展对电力系统的影响

随着经济持续高速发展和城市化进程的加速，中国已经步入机动化时代，机动车保有量不断增加。2015年全国汽车销量达2460万辆，全国汽车保有量已突破1.7亿辆<sup>[1]</sup>，汽车快速普及导致石油资源大量消耗及严重的污染物排放，实现汽车低碳化、电动化、智能化发展刻不容缓。

电动汽车作为新一代的交通工具，在节能减排、减少对传统化石能源依赖等方面具备传统汽车不可比拟的优势。作为我国七大战略性新兴产业之一，电动汽车的发展在近年来受到了大力推动。国务院2012年出台的《节能与新能源汽车产业发展规划（2012-2020年）》提出，到2015年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车累计产销量力争达到50万辆；到2020年，纯电动汽车和插电式混合动力汽车生产能力达200万辆、累计产销量超过500万辆<sup>[2]</sup>。随后，国家发改委、财政部、工信部以及各地方政府陆续出台新能源汽车补贴<sup>[3,4]</sup>、免征购置税<sup>[5]</sup>、免摇号<sup>[6]</sup>、免限行<sup>[7]</sup>、充电设施<sup>[8]</sup>及充电价格<sup>[9]</sup>方面的优惠政策，形成了完善的战略规划、行业管理、推广应用、税收优惠、科技创新及基础设施政策扶持体系，有力带动了我国电动汽车产业的迅速成长。2015年全国电动汽车销量达到33.1万辆<sup>2</sup>，接近2014年销量的4倍，占全国汽车总销量的1.32%。2015年全国新能源汽车保有量达到58.32万辆，其中纯电动汽车保有量33.2万辆，相比2014年增长317%<sup>[10]</sup>。2016年1-6月，全国纯电动汽车销量12.6万辆，插电式混合动力汽车销量4.4万辆，同比分别增长127%和162%<sup>[11]</sup>（图2-1）。

2 其中纯电动汽车24.8万辆，插电式混合动力汽车8.3万辆。

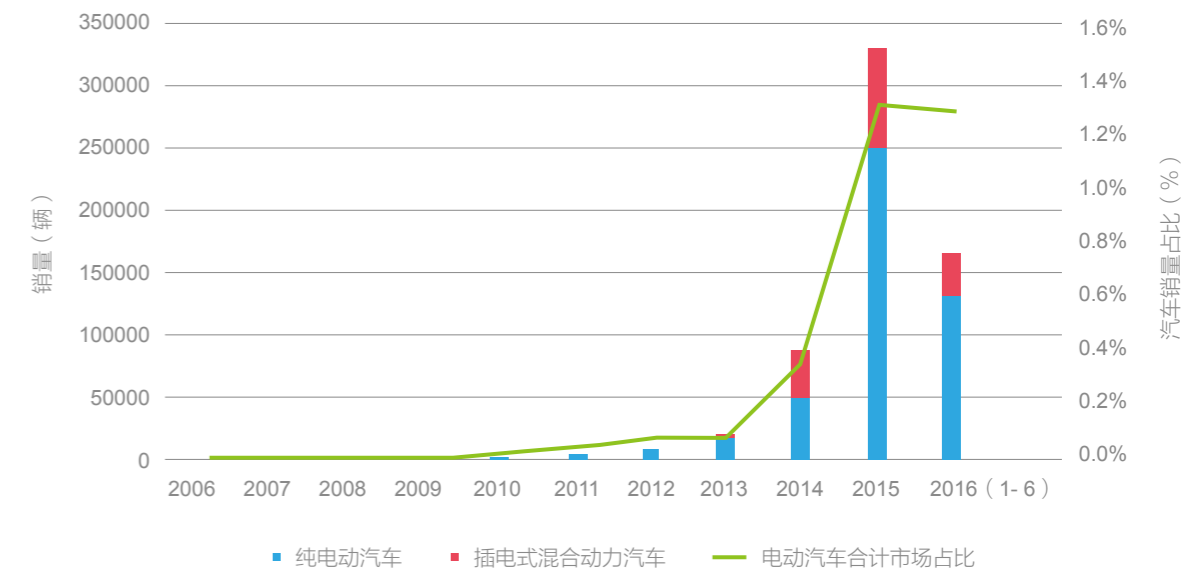


图 2-1 2006-2016 中国电动汽车销量及市场占比

作为新能源汽车示范推广城市之一，上海市电动汽车数量近年来呈现高速增长趋势。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，2015年上海市新能源汽车推广应用46507万辆，其中纯电动汽车10574辆，占比22.7%；插电式混合动力汽车35933辆，占比77.3%。2011年至2015年，全市累计推广新能源汽车57970辆，位居全国第一，其中纯电动汽车13794辆，占比23.8%；插电式混合动力汽车44176辆，占比76.2%<sup>[12]</sup>。

随着电动汽车的大规模普及，其大规模接入将对电力系统的运行和规划产生不可忽视的影响。首先，电动汽车充电将导致负荷增长，若大量电动汽车集中在负荷高峰期充电，将进一步加剧电网负荷峰谷差，加重电力系统的负担，对系统运行的可靠性和经济性产生负面影响。其次，电动汽车用户用车行为和充电时间与空间分布的不确定性，使得电动汽车充电负荷具有较大的随机性，加大了电网调度的调控难度。第三，电动汽车充电负荷属于非线性负荷，所使用的电力电子设备将产生一定的谐波，有可能引起电能质量问题。电动汽车较大的充电功率也会影响配网电压，并可能导致三相不平衡。第四，在配电网中增加众多充电设施将改变配电网负荷结构和特性，传统的配电网规划准则可能无法适用于电动汽车大规模接入的情景。

另一方面，考虑到电动汽车停车时间长、动力电池分布式储能的特点，电动汽车用户可结合日益成熟的主动配电网技术，根据电网的运行状态，如负荷水平、新能源出力、电价等信息，灵活调节电动汽车充电负荷功率，最大限度地减小电动汽车大规模接入对电网产生的负面影响，实现系统负荷的削峰填谷，并向系统提供调频与备用等辅助服务，从而推动传统电力系统的“供给跟随负荷”的运行控制方式逐步向“供给与负荷协同运行”方式转变。

## 2.2 电动汽车技术分类

电动汽车技术类型直接影响车辆对电力系统的影响。目前电动汽车技术包括四大类：1，混合动力汽车（HEV），其动力电池容量较小，主要用于提高发动机能效及制动能量回收；2，插电式混合动力汽车（PHEV），其动力电池可直接通过外部电网充电；3，纯电动汽车（BEV）不安装发动机，车辆完全由动力电池驱动；4，燃料电池汽车（FCV），通过氢燃料电池发电驱动车辆。传统混合动力汽车无需充电，与电网没有直接联系，燃料电池汽车成本较高，目前推广数量较少。因此，以下研究将主要围绕插电式混合动力汽车和纯电动汽车展开。

### 插电式混合动力汽车

上海市目前在售的电动汽车以插电式混合动力技术为主，占2015年电动汽车总销量的77.3%。插电式混合动力电动汽车（PHEV）可使用外部电网充电，并可单独依靠电池就能满足短途出行（如50公里/次）需要。当动力电池电量耗尽后，仍然可像传统混合动力汽车一样开启车载内燃机继续工作。

插电式混合动力汽车的主要优点包括：相比传统混合动力汽车有更长的纯电动行驶距离，可以满足一般通勤等日常出行需求。在长途出行情况下，车辆则使用内燃机提供能量，方便性与传统汽柴油车相同。PHEV与纯电动车同样可利用晚间用电低谷时段为动力电池充电，利用储存电力减少发动机抵消运转，改善发电机组运行效率，节省燃料，降低化石能源依赖和石油进口，减少温室气体及污染物排放。插电式混合动力汽车的工作模式一般分为两个阶段：

（1）电量消耗模式（Charging Depleting Mode, CD）

在电池组充满电（SOC（剩余电量）=100%）后的初期行驶阶段，车辆完全依靠电池电量行驶，电池组SOC波动下降，电量不断消耗，直到达到预设值（如SOC=50%）为止。

（2）电量保持模式（Charging Sustaining Mode, CS）

在电池组电量降低到一定水平（如SOC=50%）后，车辆进入混合动力模式，此时发动机与发电机共同工作，SOC基本保持在稳定水平。

在纯电动汽车市场化发展初期，充电设施和充电网络不健全，纯电动汽车充电不便，进而限制了纯电动汽车的出行半径。插电式混合动力汽车使用传统内燃机为车辆续航，弥补了电池续航能力及充电设施不足的缺陷，是一条较为实际可行的过渡型技术路线。插电式混合动力汽车技术与纯电动汽车已较为接近，但由于纯电里程要求较短，搭载电池容量较小，相较长续航里程纯电动汽车成本优势明显。

	电机功率 (kW)	发动机功率 (kW)	电池容量 (kWh)	纯电动续航 (km)	百公里电耗 (kWh/100km)
BMWi 3 Plug-in	125	28	20	150	13.3
BMW 530Le plug-in hybrid	70	177	11.4	58	19.7
BYD 秦	110	113	13	70	18.6
BYD 唐	110	151	18.4	80	23.0
Prius Plug-in	60	73	4.4	23	19.1
上汽荣威 Plugin550	67	80	11.8	58	20.3

表 2-1 国内典型插电式混合动力汽车关键参数

### 纯电动汽车

纯电动汽车是指单纯从车载储能装置（车载动力电池、超级电容、飞轮电池）获得电力，以电机驱动的车辆。根据车速的不同，可将纯电动汽车分为低速纯电动汽车（小于40km/h），中低速纯电动汽车（40-70km/h），中高速电动汽车（70-100km/h）和高速纯电动汽车（大于100km/h）。根据用途的不同，纯电动汽车还可分为纯电动轿车、纯电动客车、纯电动货车、以及一些特殊用途车辆（包括邮政用车、环卫用车、物流车辆、工程用车、高尔夫球车、游览车等）。

由于纯电动汽车完全由电能驱动，电作为唯一能源载体可实现一次能源多元化，减少甚至摆脱对石油的依赖，且纯电动汽车在使用阶段没有任何温室气体排放。此外，分散的动力电池具有电力系统分布式储能的应用潜力，有助于提升电力系统低碳高效运行能力，促进电力系统智能化转型。然而，纯电动汽车目前还存在一些技术问题，首先是动力电池的比能量（单位质量电池能量）低，导致其单次充电下续驶里程较短。第二，充电时间过长，导致车辆的机动性能较差。第三，动力电池成本较高，成为长期制约（纯）电动汽车技术推广的瓶颈之一<sup>[13]</sup>。

	续航里程 (km)	电机功率 (kW)	电池容量 (kWh)	电池容量 (kWh/100km)
北汽 EV200	200	53	30.4	15.2
日产启辰晨风	175	80	24	13.7
腾势	300	86	47.5	15.8
江淮 iEV5	170	50	23.3	13.7
众泰知豆	152	18	15	9.9
荣威 e50	170	52	22	12.9
比亚迪 e6	400	90	82	20.5

表 2-2 国内典型纯电动汽车关键参数

## 2.3 电动汽车与电力需求响应

电动汽车将为电力需求响应的发展起到重要的推动作用：首先，电动汽车是电力的新生消费，电动汽车的大规模接入带来了大量潜在电力需求，推动了终端能源消费的电气化和信息化。第二，电动汽车配备充电数据监控及计量装置，用户可通过车载电脑安排充放电计划，通过车载通讯系统与充电设施通讯，以满足充放电信息的监控、计量和交易，降低了需求响应通信、计量基础设施投入。第三，随着低碳交通等概念的兴起，车辆租赁、车辆共享等新生商业模式不断涌现，电动汽车集成运营商为需求响应市场供了竞争实体。第四，电动汽车集成运营商的引入，将整合终端用户、电力零售商、配电网等不同市场参与者的角色，有助于协调各利益相关方之间复杂的利益分配机制设计问题。第五，电动汽车用户对充电价格的接受程度相对较高，其价格上限可类比传统燃油成本，较大的电价调节空间为开展需求响应奠定了基础。综上所述，融合新兴商业运营模式的电动汽车有望成为需求响应的龙头，进而带动能源互联网的发展。

## 3 电动汽车充电负荷对上海市电网的影响

电动汽车的普及将对电力系统运行带来多层面的影响。首先，作为新型用电方式，电动汽车数量的提升势必增加用电量需求，特别当大量电动汽车在电网负荷高峰时段同时充电，将显著增加电网负荷峰值，从而对电力系统发输容量及安全稳定运行提出更高要求；另一方面，若采取有序管理和双向互动的方式，电动汽车也可被视为电力需求响应乃至分布式储能资源。此时，大规模电动汽车的接入不仅可以降低新建电力基础设施的投资成本，还可实现负荷削峰填谷、辅助服务等多重电力系统应用价值。目前，插电式混合动力汽车（PHEV）和纯电动汽车（BEV）都具备与电网进行互动的潜力。国内外科研领域近年来也对电动汽车并网对电力系统的影响展开了多方面的研究：

1) 电动汽车充电负荷对电力系统的影响。电动汽车充电负荷涉及电动汽车用户的用车行为、停车行为、充电时间、充电方式、车型种类等多种因素。由于目前电动汽车发展仍处初期，针对电动汽车用户的数据收集较为有限，研究一般通过建模仿真分析电动汽车充电电量和负荷特性。目前研究主要基于电动汽车数量规模预测或假设，在考虑电动汽车用户行为及电网运行的前提下，分析电动汽车充电对用电负荷、电网经济运行调度、电能质量、配电设备等方面的影响<sup>[14, 15, 16, 17]</sup>。

2) 电动汽车储能在电力系统中的应用。电动汽车充电不仅提升了电网负荷，基于系统运行环境的电动汽车有序充电将帮助电网平抑高峰负荷、提高系统运行效率、降低系统容量投资成本及提高系统运行灵活性等<sup>[18, 19, 20, 21]</sup>。此外，电动汽车的动力电池还可作为分布式储能单元，通过向电网或其他用户反向馈电，进一步提高电动汽车在系统中的应用价值<sup>[22, 23, 24]</sup>。目前的研究主要包括电动汽车有序充电控制和电动汽车与电网互动（vehicle to grid, V2G），也有文献称为单向 V2G 和双向 V2G。

3) 电动汽车充放电成本效益研究。电动汽车有序充电及储能的实际应用效果取决于电池充放电成本及其对电力系统服务的收益。目前这方面的研究集中在电动汽车参与电力市场辅助服务和需求响应的经济性分析<sup>[25, 26, 27, 28, 29]</sup>。

本研究基于国内外相关研究基础，以上海市为研究对象，分别从电动汽车充电需求及负荷特性、电动汽车充放电调节经济性、电力市场环境、商业运行模式、充电设施及充电价格等五个方面对电动汽车在电力系统的应用价值进行了分析。



## 3.1 电动汽车数量规模

电动汽车数量规模上限取决于当地车辆销量及车辆总需求。上海是国内首个采用车牌指标拍卖控制机动车总量的城市，近年来每年新增小客车总规模在 35 万辆左右，到 2015 年底，全市机动车保有量达 334.04 万辆<sup>3</sup>，其中汽车 291.08 万辆，较上年净增 29.53 万辆，小型载客汽车达 247.42 万辆，其中私家车占比 83.82%，每百户家庭约拥有 52 辆私家车<sup>[30]</sup>。目前在上海市市场上销售的电动汽车生产企业达到 33 家，车型达到 64 种，电动汽车产品全面推向市场。在沪牌免费等政策的驱动下，上海市新能源汽车销量增长迅猛。2015 年全市推广应用新能源汽车 46507 辆，同比增长 3 倍多，其中电动乘用车 42227 辆，包括私人车新增 29085 辆，租赁车新增 4194 辆，公务车新增 8292 辆。尤其是在 2015 年 12 月份，受企业年末推广力度加大、区县购车补贴政策到期等因素影

响，电动汽车销售出现爆发式增长，当月汽车上牌量超过 1.4 万辆，其中电动乘用车约 1.3 万辆。在售后网络布局方面，上海市已建成维护网点 131 个，其中乘用车 80 个，商用车及专用车 51 个。截止 2015 年底，全市共累计销售各类电动汽车 57666 辆，其中新能源乘用车约 51754 辆。

根据《上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016-2020)》，到 2017 年上海市电动汽车总数将达到 13.1 万辆，其中电动私人车 85000 辆，电动公务车 24000 辆，电动公交车将达到 4700 辆，到 2020 年上海市电动汽车总量将达到 26.3 万辆，其中电动私人车 172000 辆，电动公务车 49000 辆，电动公交车将达到 8000 辆<sup>[31]</sup>。上海市电动汽车发展规划如表 2-1 所示。

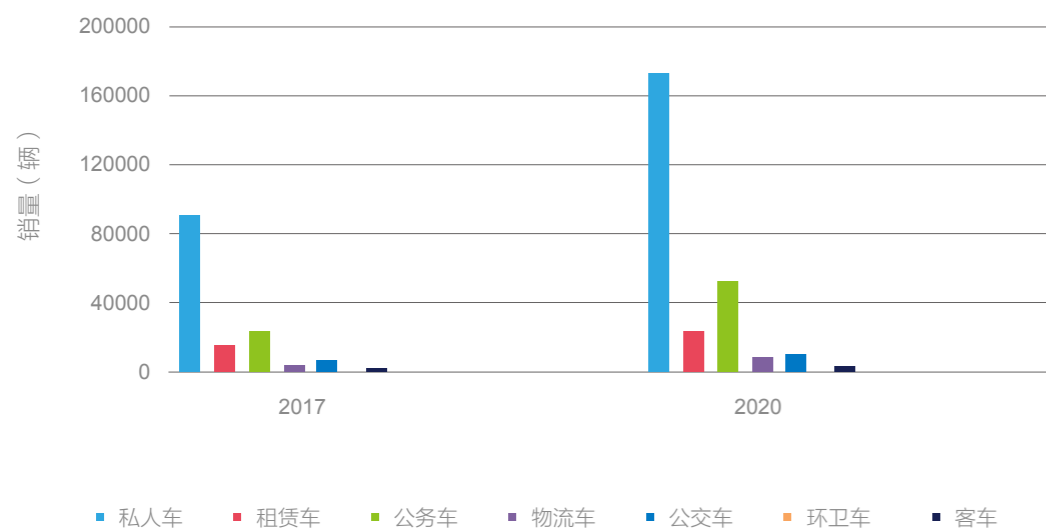


图 3-1 上海市新能源车数量规划规模

3 包括二/三轮摩托车。

## 3.2 充电基础设施

电动汽车的充电模式主要包括慢速充电、常规充电、快速充电、电池更换及无线充电。国家能源局 2012 年 3 月 1 日起实施了四项电动汽车充电接口和通信协议。根据其中的《电动汽车传导式接

口》标准规定<sup>[32]</sup>，我国的充电模式分为慢速充电(充电模式 L1)，常规充电(充电模式 L2)，快速充电(充电模式 L3)，如表 3-1 所示。

充电模式	额定电压 (V)	额定电流 (A)	充电功率 (kW)	适用场所
L1	单相交流 220	16	3.5	住宅
L2-1	单相交流 220	32	7	住宅、办公地点、公共停车场、公交场站
L2-2	三相交流 380	32	12.2	
L2-3	三相交流 380	64	24.3	
L3	直流 600	300	180	高速公路服务区

表 3-1 电动汽车充电模式

各种充电模式都有其对应的应用领域，例如慢速充电和常规充电适合在居民小区、商业地区公共停车场推广建设，而快速充电适合在高速公路沿线服务站推广建设。各种充电模式的发展也受到相应资源的限制，例如快速充电设施大规模建设受到电网容量和基础设施成本的限制；家庭充电桩受到固定停车位数量的限制；公共充电受到停车时间短的限制。因此，未来电动汽车充电难以单纯依赖某一种充电模式，需要实现多种充电模式在不同场景间的互补。

截至 2015 年底，上海市已建各种充电桩共计 2.17 万个，其中住宅建设的私人充电桩超过 1.65 万个，机关、企事业单位专用充电桩约 0.32 万个，公交、物流专用桩约 0.08 万个，社会公用充电桩约 0.12 万个。然而，目前充电设施建设受到停车场地不足的制约。上海市中心城区停车矛盾突出，居住类夜间停车缺口比例达 52%，特别是早期建设的居住区，停车矛盾尤为严重。目前上海市各充电设施建设运营单位都各自开发了自主运营的平

台，支付手段多样，但在全市范围内未形成统一的公用充电设施信息服务平台，缺乏统一、易识别、开放、便捷的支付平台。

根据《上海市电动汽车充电基础设施专项规划(2016-2020)》，上海市规划构建覆盖全市的充电设施服务网络与充电设施服务走廊，满足各类地区新能源汽车发展与使用的基本需求。至 2020 年，全市新能源汽车充电桩规模至少达到 21.1 万个。未来充电设施发展将以自(专)用为主，公用为辅、快慢结合，逐步在市域范围内形成以住宅小区、办公场所自用、专用充电设施为主体，以公共停车场、独立充电站等公共充电设施为辅的充电服务网络，并形成城际高速公路为轴线的公共充电设施服务走廊，其中自用、充电设施以慢充为主，专用充电设施采用快慢结合方式，公共充电设施以快充为主。为鼓励社会资本对充电设施建设的投资，上海市计划对专用、公用充换电设备，给予投资及运营补贴<sup>4</sup>。

4 30% 的财政资金补贴；公交、环卫运营补贴 0.1 元/千瓦时，并设补贴上限。

### 3.3 上海市电力发展趋势

#### 电力消费和电源结构

上海电网整体负荷水平一直居于中国前列，最近几年在电网的建设方面逐步趋于饱和，负荷水平基本保持稳定<sup>[33]</sup>。从上海电网的典型负荷曲线可以归纳出上海电网负荷水平的两个典型特性，第一是电网日负荷的峰谷差较大，第二是年度负荷水平基本稳定，冬夏负荷水平差距较小。这说明上海居民和第三产业负荷比重较大，与人员活动的规律有很强的相关性。上海电网的年度负荷水平呈现冬高峰和夏高峰，其中夏高峰对电网安全的影响较大。上海电网周末的负荷变化规律与工作日的相差不大，工作日与周末的用电量总体相当<sup>5</sup>。

总体而言，上海电网用电量较为平稳的特征充分体现了上海的产业结构和发展特点，由于第三产业占比较高，金融、服务业占社会经济总量的比重显著上升，人口总量也基本保持平衡，因此用电量呈现平稳的特点。

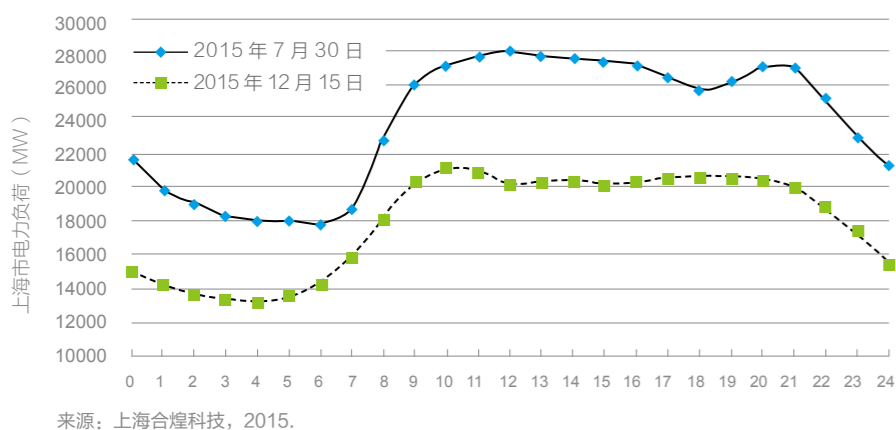


图 3-2 2015 年上海市冬、夏典型日负荷曲线

上海的电力能源结构相对单一，其中火电由煤电、燃油、燃气以及综合利用燃料组成。图 3-3 为 2015 年上海本地电源结构，其中包括 65% 的燃煤机组、26% 的燃气机和 3.6% 的燃油机组。此外还有综合利用火电的机组，这些机组主要是将城市垃圾焚烧、有机垃圾填埋气发电等环保用途的电源。

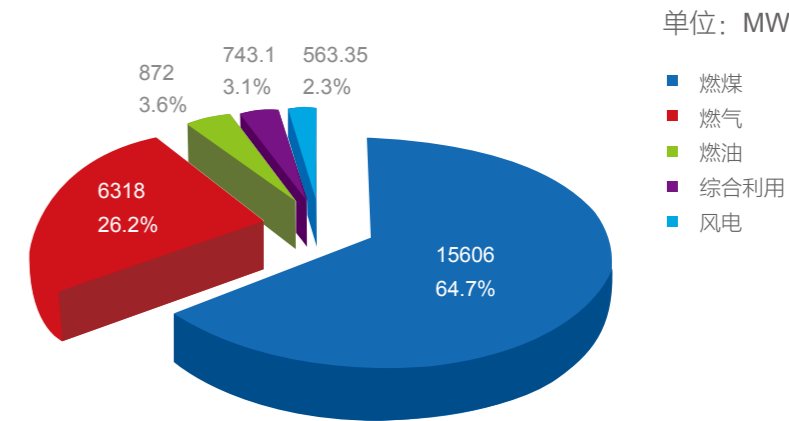


图 3-3 2015 年上海电力能源结构细分情况

“积极引入外部清洁能源、减少本地机组排放”是近年来上海电力能源发展的核心策略，但同时也给本地电网调度运行和管理带来前所未有的挑战。近年来，上海电网消纳我国西南水电来电容量持续上升并达到 1200 万千瓦，外来清洁电力的受电比例在部分时段高达 70%。大规模清洁电力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因而显著增加，电网强馈入、弱开机格局形成<sup>[34]</sup>，提升需求侧灵活性调节能力势在必行。

#### 用电需求预测

近年来，上海市用电需求增速逐步趋缓。根据上海“十二五”电力规划预计，2015 年上海电网最高负荷可以达到 3700 万千瓦，年度用电量可以达到 1715 亿千瓦时，但 2015 年上海电网实际最高负荷 2982 万千瓦，用电量也仅为 1405 亿千瓦时，与规划水平差距较大。根据中经网的统计数据，可绘制出上海电网历年用电量曲线，并基于历史数据对 2020 年和 2030 年的用电量数据进行估计（图 3-4）。

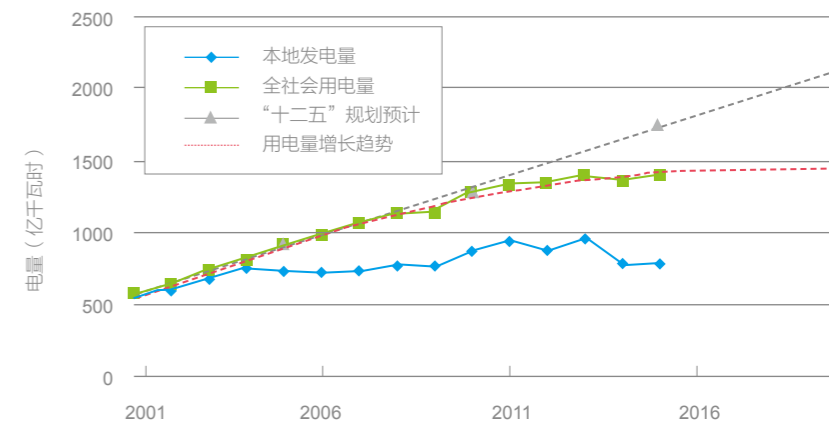


图 3-4 2020 年上海电网全社会用电量水平估计

5 2014 年 7 月 26 日（周六）日用电量为 4.52 亿千瓦时，7 月 30 日（周三）用电量为 5.08 亿千瓦时

从图中可以明显看出上海市全社会用电量已经出现了趋于饱和的势头，而且 2015 年上海第二产业用电量同比下降 1.4%，出现 40 年来的首次负增长，所以用饱和趋势对上海市的用电量进行预估相对合理。直接对数据进行二次拟合可以预计 2016 年全年上海市用电量增速不会超过 1.6%，而且增长率将逐年下降，按此水平预计 2020 年上海用电量约为 1458 亿千瓦时。将 2020 年的用电量预测值作为负荷自然增长的规律估计依据，年度平均增长率大约为 0.7%，则 2030 年上海市的年度用电量大约为 1560 亿千瓦时。

最高负荷的情况与用电量指标相似，由于国家经济转型和用电供需形势的变化，上海电网最高负荷在经过“十一五”期间的高速增长后，在“十二五”期间的增速已经放缓，因此可判断未来 5 年内到 2020 年，上海电网的最高负荷增长速度将进一步放缓，并逐步趋于饱和（图 3-5）。

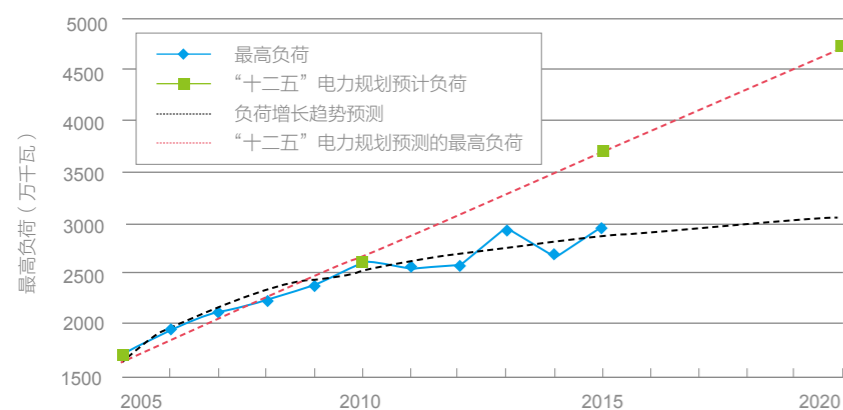


图 3-5 2020 年上海电网最高用电负荷水平估计

根据上海市统计局公布的数据<sup>[35]</sup>，虽然 2015 年上海电网负荷达到历史最高水平，但是从 2011 年开始上海电网最高负荷一直呈现震荡的趋势，且已偏离上海市“十二五”电力规划中最高负荷的预计。若按照指数规律对饱和趋势进行预测，到 2020 年上海电网最高负荷为 3040 万千瓦，到 2030 年上海电网最高负荷为 3290 万千瓦。用电需求增速放缓虽然一定程度上降低了供电容量需求，但也意味着上海市本地系统调节空间进一步缩小，导致外来清洁能源电力与本地电源之间的矛盾更加突显<sup>6, 7</sup>。

6 中电联, "向上直流" 向上海输送四川水电累计 939 亿千瓦时 <http://www.cec.org.cn/zdlhuiyuandongtai/dianwang/2015-07-08/140266.html>

7 华东能源局, 向家坝水电与沪电网跨区辅助服务补偿启动 <http://news.bjx.com.cn/html/20141205/570801.shtml>

### 3.4 电动汽车充电量需求

电动汽车充电负荷对电网峰谷负荷的影响取决于用户行为、充换电模式及充电功率等因素。本研究采用巴斯 (Bass) 扩散模型预测上海市电动汽车数量增速。巴斯模型假设一项新产品投入市场后，其扩散速度受到大众传播媒介（如广告等）和已采用者对未采用者的宣传等内部影响。以我国新能源汽车市场规模为例（见下式），其中  $n(t)$  代表  $t$  年新增的新能源汽车数量， $a$  代表创新系数（外部影响）， $b$  代表模仿系数（内部影响）。

$$n(t) = a[m - N(t)] + \frac{b}{m} N(t)[m - N(t)]$$

其中，

$n(t)$ —— $t$  年新增新能源汽车数量；

$N(t)$ —— $t$  年累计新能源汽车数量；

$m$ ——最大市场潜力；

$a$ 、 $b$ ——外部影响（创新）系数、内部影响（模仿）系数。

上海私人购买电动汽车享受免费牌照及现金补贴政策，考虑到上海市目前高达数万元的牌照价格，扶持政策无疑有力激励了电动汽车发展<sup>[36]</sup>。考虑到现行的机动车限号及财税扶持政策在未来存在一定的不确定性，研究设定两种电动汽车发展情景，即常规发展情景和高速发展情景，其中常规发展情景根据 2010-2015 年燃油汽车及电动汽车销量历史统计和 2020 年规划量进行拟合，得到创新及模仿系数  $a=0.01$ ， $b=0.08$ 。此外，考虑到技术进步及动力电池成本快速下降等因素，能源所等机构对电动汽车到 2030 年的销量增速有更乐观的预期<sup>[37]</sup>。因此，除常规情景外，本研究提出另一高速发展情景，其中创新系数维持不变，模仿系数  $b$  取 0.15。通过模型将车辆销量增速递推至 2030 年，得到常规发展情景下到 2030 年电动汽车年销量占全部汽车销量市场的 28%，电动汽车保有量达到 155 万，其中小型电动乘用车为 144 万辆；高速发展情景下，到 2030 年电动汽车年销量占全部汽车销量市场的 43%，电动汽车保有量达到 245 万辆，其中电动乘用车为 228 万辆，其中插电式混合动力汽车与纯电动汽车的比例维持不变，即 76% : 24%。

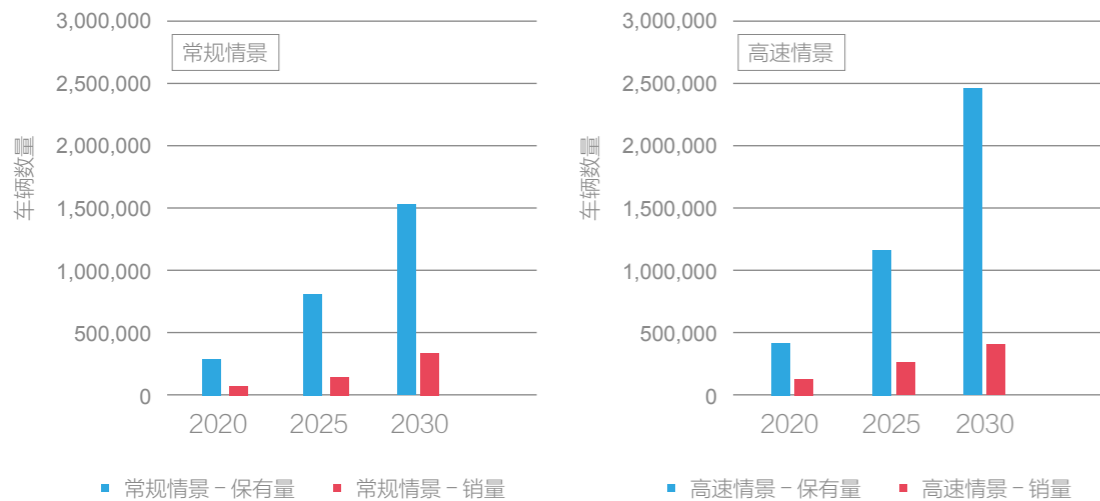


图 3-6 两种情景下上海市 2020-2030 年电动汽车销量及保有量

目前上海市在售电动汽车百公里电耗在 10kWh 至 20kWh 之间，交流充电桩充电功率在 3.3kW 至 7kW 之间，考虑到电动汽车综合能效较高，未来进步空间较为有限，本研究假设到 2030 年车辆电耗及充电功率分别达到百公里 15kWh 和 7kW。2015 年上海市比亚迪秦和荣威 E50 用户日均行驶里程分别 31 公里和 26 公里，考虑随着交通机动化率的进一步提高，未来上海市居民出行强度仍有一定增长潜力，本研究假设上海市电动乘用车日均行驶里程以每年 3% 增幅增加，则到 2030 年日均行驶里程达到 50 公里。同理推测到 2030 年，大型电动客车百公里电耗为 100kWh，日均行驶里程 300 公里，充电功率 100kW，且电动乘用车及电动客车充电效率同为 90%，则在电动汽车常规发展情境下，2030 年上海市电动汽车充电量需求约为 12.4TWh，占当年全市用电量的 7.4%；在高速发展情景下，全年充电量需求为 19.6TWh，占当年全市用电量的 11.2%<sup>8</sup>。

### 3.5 电动汽车充电负荷特性

电动汽车随机充电负荷是分析充电负荷特性及负荷调控潜力的基础。电动汽车充电负荷特性主要由用户的充电行为决定，而影响用户充电行为的因素包括出行、停车、充电的时空分布以及充电方式（功率）等。为深入研究上海市各类车型充电行为特征，本研究按五类车型在上海市选取 73 辆电动汽车进行停车及充电时间调查<sup>9</sup>，从出行时段分布来看，用户出行主要集中于早晚高峰时段（7-9 点、17-19 点），其出行次数分别占到全天出行次数的 8.8% 和 10.2%，此外午间时段也出现较为平稳的出行小高峰；而出行低谷为凌晨 1 点-5 点，该时段合计出行次数占全天出行次数的比例不足 0.7%；从单次出行来看，电动汽车用户单次出行平均时长为 35 分钟，其中 25 分钟以内出行次数占比 51%。

<sup>8</sup> 详细计算过程见附件 1。

<sup>9</sup> 包括 10 辆电动公交车、10 辆电动出租车、10 辆电动物流车、16 辆电动公交车及 27 辆电动私家车。

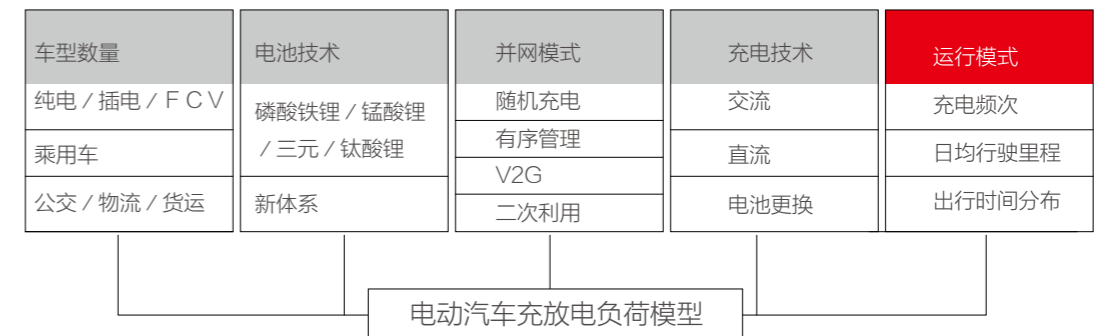


图 3-7 电动汽车充电负荷影响因素

图 3-8 列举了四类车型在具备充电条件地点 24 小时停车时间概率分布情况，以私家车为例，多数用户倾向晚间在居住小区充电，且现有私家电动汽车车主配建的充电设施一般安装在住宅停车场<sup>10</sup>，其停车高峰时间出现在晚 21:00 至上午 6 点左右，停车低谷时间出现在上午 8 点左右和傍晚 6 点左右；电动出租车停车高峰往往集中在夜间 22:00 至凌晨时段。

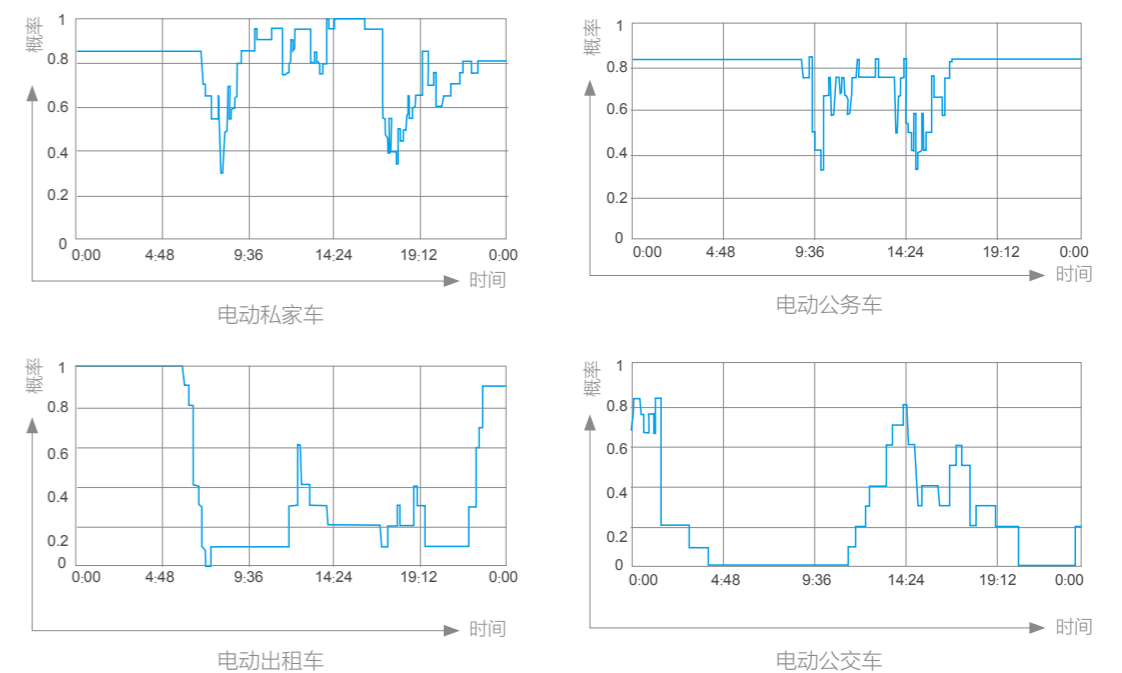


图 3-8 上海市各类电动乘用车停车时间概率

<sup>10</sup> 根据上海市经信委规定，自 2015 年开始上海市电动汽车用户必须先安装充电桩才可上牌。

单辆电动汽车充电负荷曲线由充电起始时间及持续充电时间决定，而电动汽车群充电负荷由多辆单体电动汽车充电负荷曲线叠加而成。例如，当车辆百公里电耗 20kWh，日行驶里程为 50 公里时，充电效率 90%，则日充电需求约 11kWh，若额定交流充电功率为 7kW，则电动汽车群充电高峰往往滞后于电网接入时间高峰约 1.57 小时。本研究基于上海电动汽车数量增速及电动汽车用户调研，测算了电动汽车充电负荷曲线<sup>11</sup>。结果显示，在电动汽车高速增长情景下，电动汽车充电负荷高峰为 6.33GW，出现于晚间 19:00 点左右，充电负荷低谷为 15MW，出现于凌晨 4 点左右；叠加电动汽车充电负荷曲线后，电网负荷高峰为 37.93GW，出现于晚间 20:00 左右，充电负荷低谷为 21.07GW，出现于上午 6:00 左右，电网负荷峰谷差从 11.90GW 增加到 16.86GW。综合来看，在随机充电情况下，电动汽车充电负荷将显著提升傍晚电力负荷高峰，且全天峰谷差也将有所增加，从而对电网运行产生一定压力。

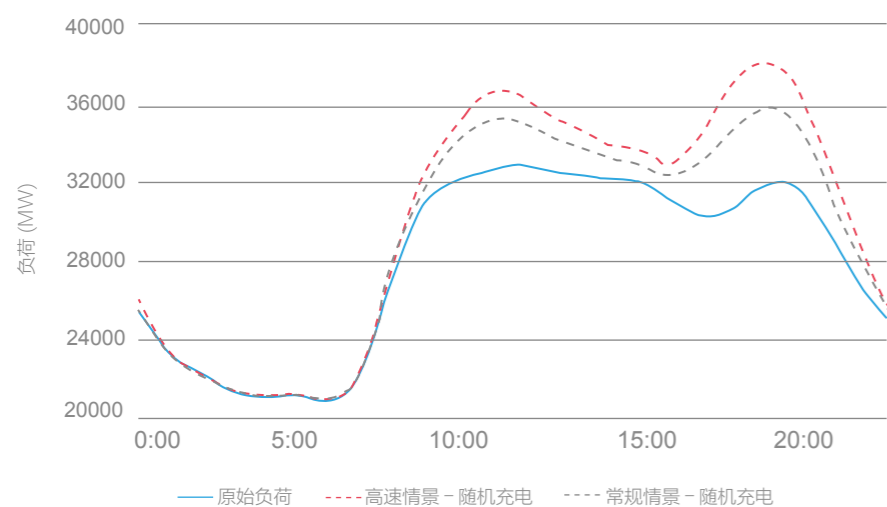


图 3-9 两种情景下 2030 年上海市夏季电动汽车充电负荷

## 3.6 电动汽车充电对输配电网的影响

大规模电动汽车充电将对现有配电网带来明显影响。根据 Navigant 预测美国 2030 年电动汽车销量超过 51.4 万辆，若不对充电负荷采取干预措施，则势必增加发电及输配电基础设施投资<sup>[38]</sup>。Hadely 及 Tsvekova 预测若不采取需求响应的负荷调控手段，到 2030 年美国 13 个北美电力可靠性组织区域内的 10 个将需要增加额外容量以满足电动汽车充电需求，其中东南部可靠性委员会（SERC）区域新增电量需求最高达到每年 34TWh，而加州新增容量比重最高达到 5.5%。美国西北大西洋实验室（PNNL）的研究显示，已建输电设施可满足 73% 轻型燃油汽车电力化的充电需求<sup>[39]</sup>。在配电网方面，电动汽车充电也将加速变压器损耗、提高线损、引发配电网线路拥堵及电能质量等问题，导致系统可靠性下降及系统升级<sup>[40]</sup>。

一般而言，大规模电动汽车充电将对配电网产生下列影响：

### 配电变压器及线路过载

配电变压器过载将来会成为电动汽车规模化运行的主要限制因素之一。电动汽车接入造成的负荷变化可能引发分时段局部配电变压器过载，导致变压器内温度升高，从而导致变压器油劣化变质、变压器内绝缘材料加速老化，从而缩短变压器的寿命<sup>[41]</sup>。此外，配电网的线路过载也是规模化电动汽车接入电网的限制因素之一，在大规模电动汽车接入电网前需同时对变压器及线路过载问题进行分析。国家电网公司曾分别对北京、浙江、江苏、安徽和宁夏五省市的 27 个居民小区和 21 座商业办公楼宇进行了分析。研究发现，在交流慢速充电模式下，当电动汽车保有量占总车辆比重低于 20% 时，绝大多数居民小区和商业楼宇无需对 10kV 配网进行改造。对于直流快速充电而言，若电动汽车保有量占比达到 20%，则有 21 个居民小区需要进行配电变压器改造，1 个居民小区需要同时进行 10kV 线路改造；12 个商业楼宇需要进行配电变压器改造，5 个商业楼宇需要同时进行 10kV 线路改造<sup>[42]</sup>。

### 谐波污染

由于电动汽车充电机内含整流装置，而整流装置作为非线性负载，会对电网产生谐波污染。黄梅等<sup>[43,44,45]</sup>针对电动汽车充电谐波污染问题和解决措施进行了较为全面的分析，认为慢速充电桩充电功率相对较小，其影响主要集中在变压器及线路容量方面，对配电网的谐波冲击有限。但大型充电站因单点大容量并网所导致的谐波污染不容忽视。单向充电机产生谐波电流次数包括 3、5、7、9 次等，三相充电机产生的谐波电流次数包括 5、7、11、13 次等，大量谐波将增加电力线路电能损耗、影响功率因数、降低继电保护的可靠性、干扰控制系统稳定性等。谐波特性与充电机的拓扑结构等因素有关，特别对于大型电动汽车充电站，可通过安装 APF（有源滤波器）等滤波装置进行谐波治理。

11 具体计算过程见附件 2。

本研究选取上海市某 10kV 工商业配电升级项目为案例评估电动汽车接入后配电网的升级成本。该配电网升级工程包括配电变压器扩容工程及电缆敷设工程两部分，其中配电变压器工程包括新增配电变压器（400kVA）、架空线、入户电缆敷设及避雷器附件安装、设计费、监理费、管理费等，工程合计造价约 38.5 万元，单位配电容量造价为 962 元 /kVA。电缆工程方面，新敷设 ZA-YJV-10/8.7-3×70mm<sup>2</sup> 交联聚乙烯（XLPE）电缆 25 米，并修复混凝土路面 14 米，工程总造价为 4.48 万元，线路容量为 3500kVA，则单位 kVA 电缆造价为 13 元。

电动汽车接入配电网首先需要改造电缆，对于线缆扩容工程一般可以按照材料费的 1.5 倍估算整体工程造价。在电动汽车汽车数量进一步增加的情况下，配电变压器增容改造工程也势必大量开展。目前 1 台配电变压器（400kVA）购置价格大约 5 万元，包括熔丝、接头等配件不超过 6.0 万元，大约占总造价的 15.8%；材料费总价 18.3 万元，大约占总造价的 47.5%。因此新建配电变压器项目的主要费用是装置性材料为主，且配电变压器本身不是影响价格的最主要因素，通常可以按照所有装置材料（含配变）的 2 倍多来估计工程总价。综上所述，单位 kVA 电动汽车接入电网后配电升级所需的设备成本约 150 元，而相关工程材料及施工成本更高，具体投资取决于充电设施建设集中度等因素。

## 4 上海市电动汽车参与需求响应的潜力及经济性分析

如第二章所述，电动汽车可通过需求响应的方式动态调节其充电功率，以实现其在电力系统中的多重应用价值。本章将分析电动汽车的负荷调节规模潜力及经济效益。

### 4.1 上海市需求响应现状

电力需求响应是提升电力系统灵活运行能力的重要方式。上海市近年来夏季电力高峰不断刷新、电力峰谷差不断加大，加之外来清洁水电比例不断加大，电网的柔性负荷调节不足对电网安全运行带来了很大挑战<sup>12</sup>。

为进一步发掘需求侧负荷调节潜力，国家发改委协同国家电网于 2014 年初向上海市经信委下达了实施电力需求响应的试点任务，要求在 35℃ 以上高温日或电力供需紧张时，组织部分试点企业和大型楼宇用户按照自愿众筹模式实施电力需求响应试点，试点现已初步形成了一批需求响应资源及响应机制，可控负荷总量超过 150MW。然而，现有的需求响应资源显然难以满足日益严峻的调峰需求，寻找新生的需求响应资源势在必行。

通过优化充电策略，电动汽车的普及不仅不会对电网运行带来明显冲击，反而可以成为高质量的系统调节资源<sup>[46, 47]</sup>。同时，车载电池也可作为储能设备用于需求响应<sup>[48, 49]</sup>。在美国已有多种需求响应或电力市场机制有助于激励电动汽车实现降低系统运行成本、延缓输配电设施升级、减少线路拥堵及提供辅助服务等应用价值<sup>[50, 51, 52, 53, 54]</sup>。

<sup>12</sup> 由于峰谷差不断加大，影响了上海本地发电容量运行效率，增加了能耗与排放。2015 年上海电力高峰达到 2981.9 万千瓦，其中 2500 万千瓦以上的高峰负荷的持续时间不到 2 周（300 小时左右），占全年时间 8760 小时 4%，若此时高峰负荷通过新建火电站满足，以上海外高桥电厂为例，500 万千瓦发电及配套系统容量投资超过 500 亿元，较低的运行小时数显然难以有效收回投资。

## 4.2 电动汽车参与需求响应的潜力

相比传统需求侧调节资源，电动汽车具有较长的停车时间和较强的充放电调节能力，特别在车辆大规模推广下，电动汽车可能成为系统最重要的调节资源之一。目前，引导电动汽车充电时间的主要方式仍为峰谷电价/分时电价机制。为进一步激励电动汽车参与系统调节，国外部分地区已将电动汽车纳入需求响应项目以充分发掘其灵活调节潜力。如何有序合理制定电动汽车充放电策略，并通过需求响应予以实施，也需要从技术、市场、政策等多方面全面推进。一般而言，电动汽车进行有序充电的潜力取决于以下因素：

1. 出行行为。出行行为的影响最直观地体现在电动汽车进行充电的空间和时间分布特性。电动汽车用户的生活习惯以及由此产生的出行行为，直接决定了电动汽车在何时何地接入充电设施以及持续时间。电动汽车日均出行距离、充电频次、接入电网的起始时间等都是判断其参与负荷调控潜力的重要依据。

2. 充电特性。充电特性包括电流和电压的变化特性等。由于不同电池技术种类、电池容量、充电功率存在明显差异，其充电特性也存在不同程度的差别。此外，交流慢速充电、快速直流充电、电池更换、无线充电等电动汽车充电方式也将影响车辆调控能力。

3. 车型规模。显然电动汽车数量将对其进行有序充电的能力产生直接影响。不同车型参与有序充电的能力也各不相同，比如，对于私家车而言，由于其停车时段较长，其参与有序充电的灵活性较高；相反，对于营运部门车辆，由于出行强度较大，有限的停车时段主要用于车用电能补给，因此其参与有序充电的能力也相对较低。

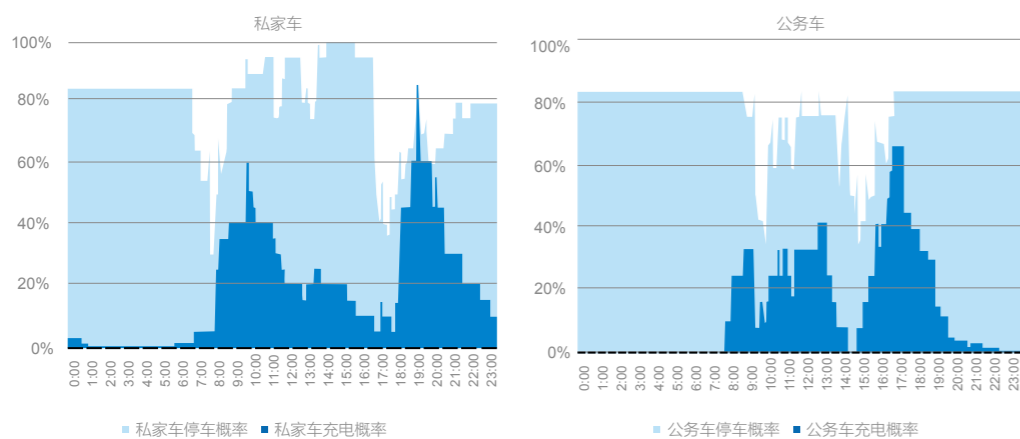


图 4-1 上海市电动私家车、公交车停车及充电时间概率

在上海市电动汽车用户行为调研中发现，在公交、出租等车辆运营部门，由于出行强度高，充电量需求大，适应负荷调控的停车时间有限，导致模型对充电行为的优化空间较小。相比之下，电动私家车、电动公务车停车时间较长但实际充电时间较短，尤其在负荷峰谷时段（中午 12 点及凌晨 5-6 点），相当比例的电动汽车处于非充电的停车状态，具有较高需求响应调节潜力（图 4-1）。对于一般私家电动汽车，平均每日出行时间一般在 2 至 4 小时之间，剩余 20 小时停车时段都可接入电网参与需求响应调节，因此其参与需求响应具有较大调节空间。

为深入分析上海地区不同电动汽车车型充电行为特征，本研究分别对电动私家车、电动公务车两类车型用户的停车及充电概率进行了对比。结果如图 4-1 所示，其中淡蓝色、深蓝色部分代表停车概率及随机充电概率。调研结果印证了上海地区这两类车型具有较大的充电调节空间，特别是在负荷峰谷时段（中午 12 点及凌晨 5-6 点），相当比例的电动汽车处于非充电停车状态，有潜力参与需求响应调节。

充电方式	最高负荷 (MW)		最低负荷 (MW)		日峰谷差 (MW)	
	时间	负荷值	时间	负荷值		
低情景	随机充电	20:00	35757	6:00	21045	14712
	有序充电	12:00	34906	2:00	23184	11722
高情景	随机充电	20:00	37931	6:00	21069	16862
	有序充电	12:00	35987	3:00	24018	11969

表 4-1 2030 年电动汽车需求响应下电网负荷

本节进而采用第三章充电负荷模型，以降低系统高峰负荷为优化目标，在电动汽车停车时间及电池容量约束下，模拟了有序充电下电动私家车、公交车充电负荷。表 4-1 对比了随机充电与有序充电下电动汽车充电负荷的差异。图 4-2 显示了两种电动汽车发展情境下，随机充电及有序充电负荷曲线，可见有序充电使电网高峰负荷一定程度降低，负荷峰谷差明显减小，大部分充电负荷转移至凌晨负荷低谷时段。

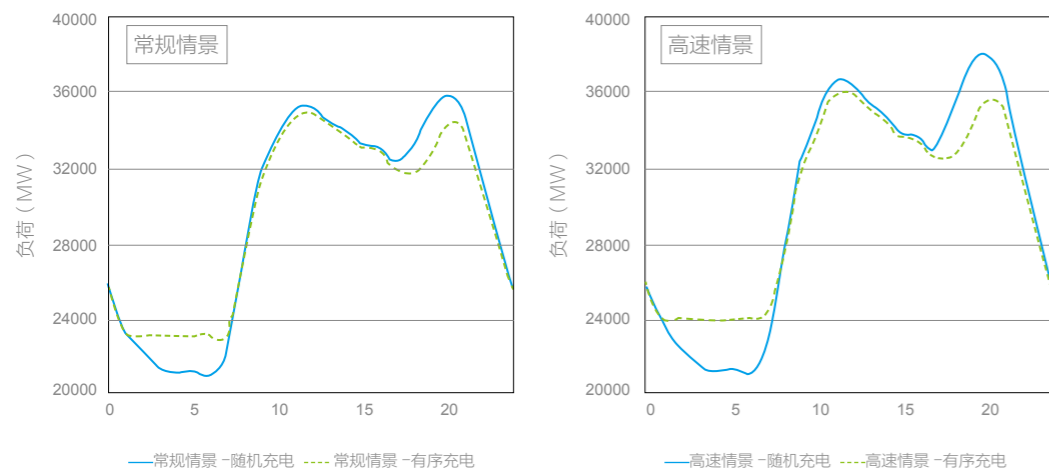


图 4-2 两种情景下电动汽车有序充电调节效果

图 4-3 为电动汽车高速发展情境下，电动私家车及公务车随机充电及有序充电负荷曲线。可见，随着需求响应的引入，大部分原本出现在午后至晚间的充电电量转移至凌晨时段，电动汽车充电负荷调节效果明显。

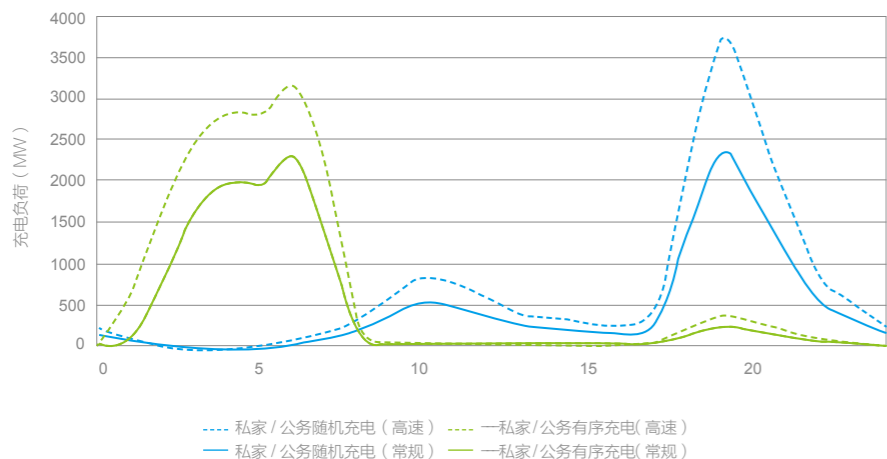


图 4-3 两种电动汽车发展情景私家车 / 公务车随机及有序充电负荷

### 4.3 电动汽车参与需求响应的经济、环境效益

电动汽车参与需求响应的经济性包括成本和效益两方面，其中充电调节的成本包括实现有序充电技术的软硬件成本以及电动汽车用户改变充电行为的支付意愿；充电调节的效益主要包括电动汽车有序充电的高峰负荷削减、填谷电量以及由此产生的环境效益（图 4-4）。

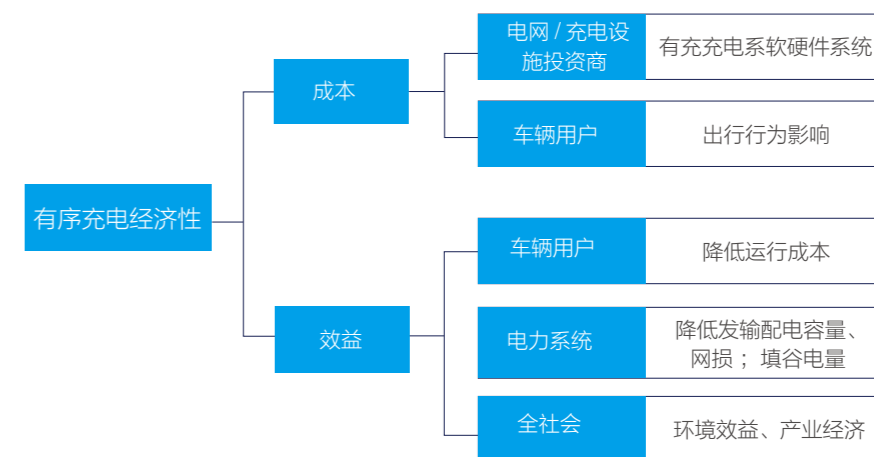


图 4-4 电动汽车参与需求响应经济性分析

一般电动私家车及电动公务车分别在住宅和办公地点通过交流充电桩充电，目前国内市场交流充电桩价格在 2000-5000 元之间，部分充电桩已具备了充电时间调节功能，充电时间调控技术门槛较低，虽然其售价相比传统充电桩略高<sup>13</sup>，但基本在同一价格区间，其与普通充电桩的制造成本差异将不断缩小<sup>14</sup>，且考虑到随着智能用电技术的发展，到 2030 年有序充电技术也有望成为充电设施的标准配置。因此，中长期来看充电时间的调节成本主要源自改变电动汽车充电行为的支付意愿。

电动汽车与传统需求响应资源相比存在较大差异。对于传统需求相应资源而言(如空调、照明等)，电能消费与电力服务同时发生，需求响应的成本与用户行为的改变程度正相关，即提升需求响应的规模往往以牺牲更多的用户自由度为代价；对于电动汽车充电，充电需求与出行需求在时间上是分离的，在车辆停驶时段内对电动汽车充电时间的选择和调整并不会影响用户的出行行为，因此其需求响应的成本相比传统需求响应资源有所降低(图 4-5)。

13 根据落基山研究所估算，增加远程控制充电时间的软硬件系统将提升充电设施成本约100美元/kW。

RMI, 2015. The Economics of Demand Flexibility -How “Flexiwatts” Create Quantifiable Value for Customers and the Grid.

14 由于实现充电时间调节需要车辆与电桩进行通信标准等方面的协同，因此即使部分充电桩具备充电时间调节（定时充电）等功能，但目前电动汽车充电一般仍采用即插即充的方式。



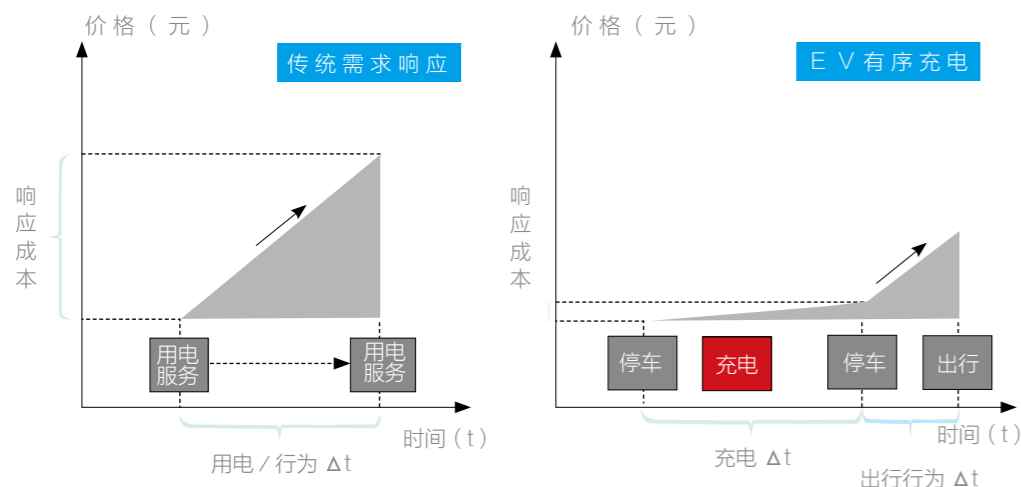


图 4-5 传统需求响应资源与电动汽车有序充电响应成本示意图

对电动汽车用户参与需求响应的价格弹性研究方面，较有代表性的是美国能源部发起的 EV Project 项目<sup>15</sup>。该研究发现价格激励能够显著影响电动汽车用户的充电行为，在圣地亚哥电力和天然气公司(SDG&E)覆盖区域，当峰谷电价比为2:1时，峰谷电价差约为0.13美元(约人民币0.85元)，70%的电动汽车用户会将充电负荷移至夜间电价低谷时段；当峰谷电价拉大到6:1以上后，价差达到0.3美元(约人民币2元)，低谷充电时段用户的比例提升至90%；而当峰谷电价进一步拉大后，新增参与充电调节的用户数量逐渐降低<sup>[55]</sup>。

现行上海市居民用户分时电价如表4-2所示，第二档低电压用户高峰时段(6:00-22:00)电价为0.677元/千瓦时，低谷时段(22:00-次日6:00)电价为0.337元，峰谷电价比近似2:1。

根据 EV Project 对充电价格弹性的分析，当峰谷电价之比较低时，电动汽车用户参与需求响应的价格弹性相对较高，而随着峰谷电价之比不断拉大，价格弹性逐渐降低，并在参与度达到90%后趋近于零。本研究认为到2030年上海市将基本建成支持有序充电的软硬件环境，则当峰谷电价之比较低(2:1)时，电动汽车需求响应参与率略高于目前圣地亚哥电动汽车用户水平达到75%，即约75%电动私家车及电动公务用车用户将响应上述分时电价将充电负荷转移至低谷时段；而当分时电价比进一步拉大至6:1后，参与需求响应的用户比例提升至90%，与目前圣地亚哥电动汽车参与率上限相同，则在电动汽车高速发展情景下，由电动汽车有序充电带来的削减负荷峰谷差及新增填谷电量如表4-2所示。

		单一固定电价	现行分时电价	充电分时电价
峰时段	6:00-22:00	0.667	0.677	0.975
谷时段	22:00-次日6:00	0.667	0.337	0.155
效益	移峰电量(亿千瓦时/年)	-	42.2	50.6
	降低峰谷差(GW)	-	3.7	4.4

来源：上海市经信委 <http://www.sheitc.gov.cn/djff/637315.htm>

表 4-2 三类电价情景下电动汽车充电调节效益

可见，当采用2:1分时电价后，大多数电动汽车将参与有序充电，系统峰谷差也从单一固定电价下的16.9GW下降至13.2GW，年度移峰电量达到42.2亿kWh，平均每辆电动汽车的有效调节功率为1.8kW，有效调节电量为2050kWh(移峰电量)；而当分时电价比拉大到1:6之后，系统峰谷差进一步降低0.7GW，年度移峰电量达到50.6亿kWh，平均每辆电动汽车的有效调节功率2.1kW，有效调节电量为2460kWh。

在单一固定电价情况下，平均每辆电动汽车每天充电电量为8.33kWh，年度充电成本为2028元。在2:1分时电价情况下，充电量需求不变，年度充电成本下降65%至709元；在6:1分时电价情况下，充电量需求仅为原始成本的19%，即392元。

电动汽车有序充电带来的降低负荷峰谷差的效益可通过减少容量费体现。我国基本电费一般按照变压器容量(kVA)或按照最大需量(kW)计量，与用电量无关，其计量方式由用户自行选择。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(与变压器容量对应)之积；对于按照最大需量计量的用户，其基本电费为最大需量与基本电价(与最大需量对应)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。目前上海市电网两部制分时电价用户夏季容量电价为40.5元/kW/月，则年度容量成本为486元，考虑到未来上海市发电容量的边际增量将主要依靠外部输入，则加之输配电线损成本单位kW容量成本将达到550元-600元，即当每辆电动汽车有

效调节容量为2.1kW时，年度容量价值约1150-1260元/车<sup>16</sup>。

电动汽车有序充电带来的移峰电量效益主要通过增加负荷低谷时段可再生资源发电消纳量体现。目前上海市电网受入大量西南水电，特别是向家坝-上海±800千伏/700万千瓦特高压直流工程投运后，每年向上海输送320亿千瓦时清洁电力，最大输送功率约占上海高峰负荷的三分之一。截至2015年7月8日，向上直流已向上海输送四川水电累计达939亿千瓦时。大规模引入西南水电明显增加了上海电网调峰压力。为补偿上海电网发电机组提供的辅助服务，华东能源监管局于2014年组织开展了向家坝水电站与上海电网跨区辅助服务补偿机制试点工作，以提高上海区内燃煤机组的调节积极性<sup>[56]</sup>。电动汽车有序充电的填谷负荷将缓解上海市电网调峰压力，若调峰能力的提升可直接转化为电网对水电等外部清洁电力消纳的增量，则按245万辆电动汽车每年填谷电量50.6亿kWh完全用于消纳外来水电计算，电动汽车有序充电将帮助上海电网每年减少燃煤消耗230万吨/年，减排烟尘0.2万吨、二氧化硫1.1万吨、氮氧化物1.2万吨、二氧化碳450万吨。

除此之外，电动汽车有序充电还将起到降低网损、缓解输电拥堵、提高供电质量和供电可靠性等作用，开展有序充电还将带动上海市智能充电设施、智能配电网等一系列能源互联网相关产业发展，从而进一步加快当地整车、电机、电池及充电设施装备制造等相关产业投资及产值增速。

15 该项目2009年10月启动，主要任务是包括在美国17个地区构建成熟的电动汽车充电设施；部署基础设施建设；建设12000个AC level 2充电设备和100DC快速充电机，到2015年已有超过8000用户注册该项目，由爱达荷国家实验室(INL)负责数据收集。

16 假设发电容量成本3500元/kW，资本周期10年，加权平均资本成本(WACC)为8%，平均线损率7%。

## 4.4 电动汽车 V2G

随着电动汽车与电网通讯及电力双向互动技术标准的完善，电动汽车未来也可作为一种分散式的储能设施参与电力系统运行。与一般需求响应不同，电动汽车 V2G 是一种车辆与电网之间的双向电力互动。目前国内市场上也已出现了具备自放电功能的电动汽车车型，可以实现车与车之间、车与其他负荷之间、乃至车与电网之间的电流双向传输<sup>[57]</sup>。

电动汽车 V2G 参与系统调节的优势包括：1. 调峰响应速度快。具备双向功率调节功能的电动汽车充放电转换可在毫秒内完成，而传统调峰由于考虑到机械原件的寿命，运行状态的切换时间较长；2. 调峰综合效率高。动力电池的充放电效率（85%–95%）比一般抽水能电站（75%）运行的平均综合能效更高；3. 调峰过程网损小。由于电动充电设施通常布局在城市用电负荷密集地区，充放电从配电网末端分散接入，因此可直接供给负荷，减少调峰电厂远距离输送的网损；4. 初始投资成本低。电动汽车 V2G 可充分利用闲置电动汽车的储能资源，实现车辆与电网间双向互动的投资成本相对较低。

欧美等国较早开展了电动汽车 V2G 参与电力系统运行的研究。1997 年特拉华大学 Kempton 教授首次提出了 V2G 的概念<sup>[58]</sup>，随后对 V2G 的可行性<sup>[59]</sup>与潜在效益<sup>[60][61]</sup>进行了一系列的研究。研究表明，相较传统电源，电动汽车作为分布式储能资源，具有高容量、低电量、单位电量价格高，响应速度快的特点，因此适合于在单位容量价格较高，持续时间要求短、对响应速度要求高的场合提供辅助服务。

一系列的文献<sup>[62][63][64][65][66][67]</sup>分析了单辆不同类型电动汽车在不同电力市场参与辅助服务的成本与效益，计算结果差异较大。如文献<sup>[68]</sup>研究了纯

电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车参与调频和备用服务的成本与效益，研究结果表明，电动汽车参与调频服务的收益最大。文献<sup>[69, 51]</sup>研究不同类型的纯电动汽车参与纽约电力市场、加州电力市场、德州电力市场和 PJM 市场提供调频服务的收益，结果表明，当允许电动汽车仅提供下调服务时，所获得的净收益最大，这主要是由于电动汽车需通过降低充电功率或者向电网馈电才能提供上调服务，这需要加大对充电设施（双向充放电装置、双向电量计量装置）的投资。

虽然电动汽车 V2G 相比传统储能资源具有上述优势，但其商业化推广也存在许多障碍，除上节讨论到的动力电池成本问题，其对现有电力系统运行方式也有深刻影响。

电动汽车 V2G 的引入将改变现有电力市场结构，不仅增加了一类新的分散式电源，还改变了电网公司与发电个体之间的关系，使电网公司直接与充电具有随机性和利益复杂性的电动汽车用户发生关系。

从市场交易的角度讲，传统市场中，电能由发电侧直接单向传递给电网公司，再由电网公司传递到负荷侧，因此资金流也是单向传递；而在含 V2G 的市场中，电能和资金在电动汽车和电网之间双向流动。由于频繁放电加速电池老化，电网公司需要通过制定反购电价影响电动汽车用户的充放电行为，使用户在满足出行电能需求的前提下，自愿为电网提供服务。

从技术方面看，只有聚集大量电动汽车同时参与系统服务，V2G 资源才可能提供与大型机组类似的可靠性服务，因此 V2G 有赖于智能电网的建立和电动汽车车辆的普及。

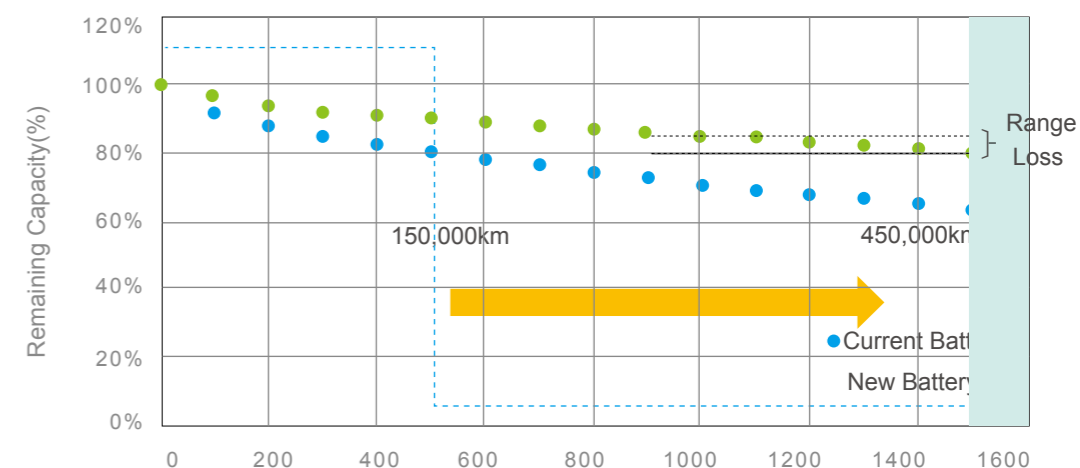


图 4-6 电动汽车 V2G 成本下降潜力

电动汽车 V2G 应用的经济性与动力电池循环寿命高度相关。以目前动力电池循环寿命而言，容量保持率衰减至 80% 前的车用电池寿命大约只可满足 15 万公里累计续航里程，而这只可基本满足电动汽车用户出行需求（图 4-6）。然而，随着动力电池容量及循环寿命不断提高，其参与 V2G 的潜力将迅速提升，即当电池累计可提供的续航里程显著高于普通用户出行里程需求时，电动汽车可

几乎无成本提供 V2G 服务，从而大幅提升动力电池的综合利用价值。

总而言之，目前电动汽车 V2G 的市场环境仍不成熟，且其技术成熟度及经济效益仍然偏低。但是从长远来看，随着电动汽车大规模应用，电池成本有望显著下降，电动汽车与电网互动不仅能够带来可观的经济效益，还具有巨大的社会和环境效益。

## 4.5 上海宝马互联驾驶研究院电动汽车储能项目

本节简要介绍了 BMW 上海皋兰路互联驾驶研究院动力电池储能项目。

研究院采购 7 辆华晨宝马芝诺电动汽车车用动力电池，储能容量为 313kWh，用于研究院楼宇供电。研究院用电负荷主要包括服务器机房用电、空调、电梯、电动汽车充电桩（4 个）以及四层楼宇其他常规用电，其中服务器机房及空调用电负荷（夏季）较高。楼宇与电网连接，电池储能能在夜间

（22 点-次日早上 7 点）低谷电价时段进行充电，在白天用电高峰向楼宇放电。电池放电到预定值后（3 点左右），楼宇再转由电网供电，电池放电时段楼宇完全依赖电池供电。电池 PCS 额定充电功率 130kW，额定放电功率 100kW，研究院还安装有 5 块（规划更多，但存审批问题）光伏电池板（夏季最高出力 5 千瓦，平均出力 1-2 千瓦），向电池供电。



图 4-7 上海宝马互联驾驶研究院电动汽车及储能项目框架示意图

如图所示，某夏季典型日（2015.8.25，周二）电池最高放电功率 62kW，最高充电功率 50kW；电网最高放电功率 80kW（下图）。313kWh 电池分为 5 个电池柜（并联），每个电池柜含 24 个电池箱（串联），每个电池箱含 10 个电池单体（串联），即每个电池柜含 240 个电池单体，5 个电池柜共计 1200 个电池单体，每个单体容量为 0.26kWh。项目运营大约 3 年时间，电池容量从初始的 313kWh，降低到约 260kWh（2016.4.18），期间 2013 年 8 月电池容量为 310kWh 左右，平均每日充放电一次循环 3 年运

行（约 1000 次循环）容量保持率为 83%。

除了该项目之外，国外的先进案例中也显示了很多值得借鉴的经验。附录六介绍了美国和德国的电动汽车试点项目，就如何针对当地电力使用情况、电动汽车普及情况、市场规模等因素综合制定项目的发展目标和行动措施，提供了有效的建议应对平衡电动汽车的充电给电网造成的波动、合理利用可再生能源产生的清洁电力、发展电动汽车市场及其配套设施等问题。

# 5 电力市场及运营模式建议

建立合理的电力市场机制可鼓励电动汽车参与各类电力系统服务。为更好地激励电动汽车用户主动参与车辆-电网的互动，充换电设施投资及运营企业应当利用电力体制改革契机，合理布局充电设施，设计商业运营模式，为用户提供具有吸引力的电价、服务合同及其他经济激励。

## 5.1 电力体制改革与电动汽车

通过分析国外电力市场机制对系统灵活性的激励效果，可以发现以分时段电量为交易标的的集中竞价现货市场可以提升电力系统灵活性。虽然各国电力市场在现货交易定价结算机制上存在较大差异，但均对现货市场时段进行了细分（小时、十五分钟或五分钟为单位），这能够充分调集各类灵活性资源通过电能市场不同阶段的现货交易发挥各自优势，以及时调整供需，帮助实现削峰填谷、合理优化配置电力资源的目的；另一方面也降低了实时阶段系统调节偏差和灵活性资源不足的风险。此外，各实时电能市场的交易时段（实时经济调度间隔）较短，这使系统运营商能够根据当前发电出力与负荷需求的变化及时迅速发出相应的调度指令，更有效地调用当前系统的灵活性资源，从而保障电力系统的实时供需平衡，提高电力系统灵活性。

近些年来，我国大规模可再生能源发电、核电、抽水蓄能、分布式能源等新兴的发电技术得到了迅速的发展，电源结构发生了较大变化，发电侧和用电侧侧均有大量变动性和不确定性因素影响电力系统的运行，而现有的灵活性资源却面临减少甚至不足的情况。建立竞争性的电力现货市场，以取代目前我国现行的计划调度方式，是解决上述问题的根本途径。

我国现有的调度计划安排不论从发电侧还是用电侧，仍然采用的是具有计划经济特征的管理方式，导致电动汽车及储能等灵活性资源缺乏主动参与系统平衡调节的积极性。

首先，从用电侧看，根据《有序用电管理办法》，当出现电力供需紧张或高峰时段供不应求时，调度机构将直接采用避峰、限电、拉闸等强制性手段以削减负荷，达到发用电平衡的目的，这在对被迫限制用电甚至停电的用户造成经济损失的同时，也未有效挖掘需求侧响应资源的潜力，使其为参与系统平衡调节提供容量或电量资源。虽然电动汽车具有较强的灵活调节潜力，但经济补偿仍是激发其灵活调节潜力的必要手段。

第二，政府制定的售电价格存在较大延迟性，无法及时反映灵活性资源的价值。电力系统在不同的运行状态和不同时段的灵活性资源的价值是不同的，现货电价能够及时的反映当前备用资源的稀缺情况，例如当现货电价较高时，说明当前备用资源相对较少，灵活性资源价值上升；当现货电价较低时，说明当前系统备用资源充裕，灵活性资源价值下降。而我国目前的上网电价采用的是政府定价的模式，其价格水平在较长一段时期内不发生变化，上网电价无法反应短期（如小时、天）的供需形势变化，从而缺乏有效的价格信号反映电动汽车等灵活性资源的价值。

第三，我国现有辅助服务机制一定程度上提升了我国电力系统灵活性，但仍存在着不足。“两个”<sup>17</sup>的出台实施，使得承担辅助服务较多的发电企业能够获得一定补偿，而承担较少或不承担辅助服务费用的发电企业需要支付辅助服务费用，这在一定程度上提高了发电企业提供辅助服务的积极性，从而使得系统能够获得更多的灵活性资源。然而，现行的辅助服务机制仍以燃煤火电和水电为主，未将电动汽车等新兴灵活性调节资源纳入市场交易。燃煤及水电机组调峰能力受不同季节来水情况和供暖需要制约，特别是未来随着可再生能源机组装机容量比例的增加，系统需要更多电动汽车等灵活性资源提供辅助服务。而为将电动汽车纳入电力市场运行，一方面要求现有辅助服务的分类和技术标准进行相应的扩充，破除政策和规则上的障碍；另一方面则增加了辅助服务成本核算的复杂程度。现行基于成本核算的价格补偿方法难以应对如此复杂的成本效益关系，也难以充分反映不同种类辅助服务在不同时段市场价值的变化。

综上所述，电能市场和辅助服务市场的建设应更好地反映系统灵活性资源的市場价值，完善的市场机制也便于电动汽车用户和集成商选择合理的电力市场参与策略。因此，建立具备灵活反映电力和电网服务价值的电力市场是激励电动汽车融入电力系统运行的基本保障。

## 5.2 电动汽车商业运营模式对比

与传统需求响应资源相似，电动汽车具有资源分散和不规则的特点，且其不规则性体现在电量和容量两个维度，因此两者分散无序地接入电网难以形成有效的灵活调节效果，而商业运营模式的选择直接影响着电动汽车在电力系统中的应用价值。

由于电动汽车主要服务的仍是出行，其与电网之间实际互动效果很大程度取决于车辆出行强度、停车时间、充电频次与时间等因素。第四章的分析发现，只有通过有序接入的方式才可充分可最大程度释放电动汽车需求响应的潜力，而对大量分散电动汽车充电需求进行整合将大幅提升其可预测性和可控性，从而提升电动汽车在电力系统中的整体应用价值。因此，通过合理的商业模式对分散的电动汽车进行系统聚合势在必行。

聚合式充电负荷调控下，电动汽车充电服务可由充电服务商提供，系统调度指令直接发向充电服务商，充电服务商根据批发市场形成的价格信号和其可调用的充电资源，通过实时通讯和电价套餐等激励手段改变电动汽车用户充电行为，以响应调度指令。在聚合式负荷控制方式下，电动汽车参与需求响应的策略由充电服务商制定，因此可降低电网直接调度大量分散电动汽车的难度。与每个电动汽车用户分别进行合同交易相比，电网调度可直接与充电服务商进行交互，由充电服务商决定由哪些电动汽车参与需求响应，从而大大降低与大批分散用户签约的合同成本。

随着通信及物流技术的发展，聚合式充放电运营模式将逐渐成熟，其可面向其他车辆运营部门乃至私家车用户，充电服务商负责购置动力电池和电动汽车充放电服务。充电服务商可投资建设并运行充放电基础设施，也可作为虚拟运营商只负责满足用户的电力市场交易需求。此外，充电服务商还应负责动力电池的循环利用，设计动力电池在乘用车、公交车、储能电站之间的梯次利用，以及退役电池的回收。该模式适合电动汽车初期推广阶段，交通运营部门（如公交、出租、汽车租赁等车辆运营企业）可将与动力电池相关的一切业务转交由集成运营商管理。目前深圳市出现的融资租赁、车电分离等商业模式是其典型代表<sup>[70]</sup>。

随着车联网技术的日益进步，不同用户间进行车辆共享的门槛及成本将不断降低。充电服务商可藉此进一步整合购置车辆、车辆维护、车辆保险等与用车相关的业务<sup>[71]</sup>，用户只需通过移动互联网向车联网实时定制车辆出行，而充电服务商则向用户提供包括车辆、电力、出行路线选择等一整套交通出行服务。通过集成运营，用户可在分享参与电力市场交易收益的同时，避免复杂的交易技术细节。目前出现的电动汽车分时租赁、车辆共享等商业模式便代表了其发展方向<sup>[72]</sup>。

17 《并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华北区域发电厂并网运行管理实施细则》。

## 5.3 充电价格体系及其问题

充电价格是引导充电行为的重要手段。目前上海市充换电企业可向电动汽车用户收取电费和充换电服务费<sup>[73]</sup>。电费方面，为新能源公交车提供服务的，执行两部制分时“工商业及其他用电”价格；其他经营性集中式充电设施，执行“铁合金、烧碱（含离子膜）用电”价格；在向电网企业报装的居民家庭住宅、居民住宅小区、执行居民电价的非居民用户中设置的充电设施充电，执行居民用电平均电价水平；其他充电设施用电，按其所在场所执行分类目录电价。充电服务费方面，执行政府指导价，上限为每千瓦时 1.3 元。

综上所述，目前上海市电动汽车充电价格主要由容量电费、电量电费及充电服务费构成，而三方面价格机制都存在一些问题：

容量电费方面，按照国务院《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》<sup>[74]</sup>及国家发改委《关于电动汽车用电价格政策有关问题的通知》<sup>[75]</sup>相关规定，2020 年电动汽车充电免征基本电费。然而，电动汽车充电设施负荷率相对较低，特别是专用电动汽车充电桩，日平均负荷时间往往仅 1-2 小时。电动汽车充电设施较低的负荷率和免征基本电费意味着其他用电负荷承担了更高的容量成本。随着 2020 年后电动汽车数量进一步增加，是否征收电动汽车基本电费以及如何征收仍然有待研究。

电量电费方面，由第四章分析可知在定时充电等技术环境成熟的前提下，电动汽车具有较强的需求响应敏感度和响应精度，一定的分时电价比即可带来较为明显的充电行为响应效果。然而，正是由于电动汽车需求响应精度较高，现行静态分时电价机制可能在低谷电价与高峰电价的转换时点引发新的负荷高峰。采用第四章需求响应分析方法，在电动汽车高速发展情境下，若参与需求响应的电动汽车用户集中在晚间 22:00 开始集中充电，则该时段上海市电网总负荷将突破 40GW，远高于全天负荷峰值。因此，传统静态的分时电价机制可能不再适应电动汽车，而引入实时电价或充电服务商或许将更有助于充电行为的有序引导。

充电服务费方面，目前上海市按照充电度电设定统一的价格上限。充电服务费设立的主要作用是补偿充电基础设施成本，引导社会资本投入充电基础设施建设。目前各类充电基础设施成本存在较大差异（表 5-1），例如直流快充设备的成本普遍明显高于交流慢充设施，采取统一的充电服务费价格上限将难以有效激励快充设备的敷设。特别是随着智能充电、无线充电等新一代充电技术的日渐成熟，未来有必要对充电服务费进行动态调整以鼓励新型技术的推广应用。

	品牌	安装类型	功率（kW）	价格（元）
交流	星星	壁挂式	6.6	2299
	德和	立柱式	7	3200
	轻候	壁挂式	7	2500
	点点	立柱式	3.2	960
直流	光合	立柱式	20	48000
	蓝海	立柱式	30	32000
	泰坦豪特	立柱式	60	69000

表 5-1 国内典型电动汽车充电桩功率及价格

## 6 研究总结 / 进一步研究建议

本研究根据上海市电力系统调峰需求与电动汽车用户出行特点，分别对电动汽车充电需求及负荷特性、电动汽车充放电调节潜力及经济性进行了分析。基于上海市电动汽车用户行为调查，本研究发现在随机充电的情况下，电动汽车充电高峰与电网原始负荷高峰并不重合，但若电动汽车数量大幅增加，充电负荷将显著提升上海市傍晚电力负荷高峰，且全天峰谷差也将有所增加，从而对电网运行产生一定压力。因此，推行有序充电对于缓解未来大规模电动汽车发展对上海市电力系统的冲击仍具有重要意义。研究也发现，由于电动私家车和电动公务用车出行强度较低、停车时间较长，其也具有较高的需求响应潜力。采取有序充电策略后，两类车型将有望成为未来上海市电力系统重要的需求侧调节资源。将电动汽车纳入需求响应不仅能够对电动汽车用户、电网企业带来可观的经济效益，还可实现巨大的社会和环境效益，且从长期来看，电动汽车有序充电对提升上海市电力电网所带来的“填谷”价值将高于“削峰”价值。相比于其他需求响应资源，电动汽车通过改变充电时间参与电力系统调节具备相当的成本优势潜力。虽然目前电动汽车通过 V2G 的方式参与系统运行的成本仍然较高，但未来随着电池容量的提升和循环寿命的延长，其经济性也将逐渐显现。当然，若要充分发掘电动汽车的系统价值，电力现货市场的建立和完善是重要前提。集成充电服务商也可从商业模式层面有效提升电动汽车参与充放电调节的效率，从而提升电动汽车的系统应用价值。最后，充电模式的选择和充电设施的布局也将对电动汽车充电行为产生重要引导作用。总而言之，未来电动汽车在上海电力系统中具有重大应用潜力，而充分释放该潜力取决于充电技术、运行模式、电力市场、充电设施、价格机制等多种因素：

### 6.1 加强有序充（放）电技术研究

目前已建和在建充电设施的监控系统对有序充电的支持水平参差不齐，即便是支持有序充电，该系统在与电网运行系统的衔接上也存在问题。随着电动汽车的规模化应用，电动汽车将最终将作为分布式移动储能设施，从而对有序充放电提出更高要求。实现电动汽车有序充放电取决于车辆、充电设施及电网企业，因此，有序充放电技术研究应充分融合各利益相关方。对于电网企业而言，应将充电设施作为电力设施对待，将充电网络作为配电网有机组成部分，综合考虑充电设施和电网的规划、设计、建设、运营，加快统一的充电服务运营平台的建设，推动电动汽车充电设施与电网协调发展。

## 6.2 实施聚合式充电负荷调控

---

大量分散的电动汽车随机充电负荷难以被精确预测和调度，降低了其电力系统应用价值，而引入充电服务商等运营主体通过聚合式充电负荷控制可有效改善电动汽车充电规律性，从而充分发掘电动汽车在电力系统中的应用潜力。但在具体实践中，如何实现充电聚合却仍面临众多挑战，尤其在电动汽车用户聚合模式、车辆及电池信息监测与跟踪技术、包含充电服务商的电力市场机制等方面都需要较长时间的探索。

## 6.3 建立反映灵活性资源价值的市场环境

---

电力市场是电动汽车与电网互动效果的必要条件。我国现有的调度计划安排方式对系统灵活性资源难形成有效的激励，上网电价机制缺乏合理的价格信号，未能及时反映灵活性资源的价值，各类灵活性资源缺乏参与系统平衡调节的积极性。因此，应尽快建立竞争性的电力现货市场以取代目前我国现行的计划调度方式，同时研究制定反映电动汽车等灵活性调节资源系统价值的市场机制，并适当降低电动汽车参与电量与辅助服务市场准入门槛。

## 6.4 加快住宅及办公地点充电设施建设

---

充电设施选择是决定电动汽车调节潜力的重要因素。从提升电动汽车充电灵活性的角度而言，应优先建设住宅及办公地点充电设施，以引导电动汽车长时间且有规律的停车及充电行为，从而为电动汽车有序充电营造调节空间。与此同时，应加快与之对应的定时充电、智能充电软硬件设施推广应用，为电动汽车用户参与负荷调控奠定基础。

## 6.5 研究制定充电价格体系

---

目前上海市充电价格还有待完善，特别有待深入研究的是：如何协调容量电费、电量电费、充电服务费三者的关系，在保持电动汽车相对于燃油汽车的燃料成本优势的前提下，充分引导电网友好的充电行为，同时弥补充电基础设施早期建设的大规模投资。

## 6.6 研究局限与展望

---

本研究对电动汽车技术进步预测主要基于历史数据及业内保守判断，但未来随着电池、充电技术的快速进步、车辆运营模式的变化，电动汽车参与系统运行的潜力也将相应发生改变。其次，目前国内电动汽车发展政策仍主要关注推广数量，然而随着电动汽车数量的不断提升，电动汽车与电力系统，尤其与可再生能源之间的协同将是实现电动汽车实现清洁可持续发展的重要前提，相关研究也是未来将电动汽车纳入碳市场交易的基础。第三，未来车辆共享、分时租赁、无人驾驶等交通运营新业态将对电动汽车参与电力系统运行带来深刻影响，一方面集中运营模式将提升分散车辆接入系统的有序性和可调节性，但另一方面车辆使用率的提高也将缩短其接入电网的时间，其综合影响仍需深入分析。此外，下一步研究还应对电动汽车有序充电对提升可再生能源发电消纳能力的经济效益进行定量分析，并提出电动汽车充电价格体系设计的具体方案。

# 附件

## 附件 1 充电量计算过程：

电动汽车充电量需求为不同类型车辆（私家车、公务车、公交车、出租车、物流车）、不同技术（纯电动汽车、插电式混合动力汽车）充电需求的加总：

$$EC_{i,m,t} = \sum_{model} \sum_{tech} \frac{Stock_{i,m,t} \times Distance_{i,m,t} \times FE_{i,m,t}}{Charge_{i,m,t}}$$

其中：EC<sub>i,m,t</sub>: 第 i 年 m 型车辆 t 动力技术充电量需求 (kWh)；

Stock<sub>i,m,t</sub>: 第 i 年 m 型车辆 t 动力技术车辆数 (辆)；

Distance<sub>i,m,t</sub>: 第 i 年 m 型车辆 t 动力技术运行里程 (km)；

FE<sub>i,m,t</sub>: 第 i 年 m 型车辆 t 动力技术能效 (kWh/km)；

Charge<sub>i,m,t</sub>: 第 i 年 m 型车辆 t 动力技术 (%)。

## 附件 2 充电负荷计算过程：

电网第 i 小时总负荷为第 i 小时电网原始负荷与第 i 小时电动汽车充电负荷之和，即：

$$P_i = P_{o,i} + P_{v,i}$$

其中，Pi: i 小时电网总负荷；

P<sub>o,i</sub>: i 小时电网原始负荷；

P<sub>v,i</sub>: i 小时电动汽车充电负荷。

本研究假设电动汽车用户出行后便开始充电行为，则电动汽车在第 i 小时的充电负荷可分为在第 i 小时开始接入电网充电的电动汽车充电负荷与此前若干小时中 (i-n) 陆续接入电网充电但在第 i 小时未充满车辆的充电负荷，因此叠加充电负荷的小时数取决于电动汽车充电时间：

$$P_{v,i} = \sum_0^t P_{v,i'} + P_{v,i'-1} \dots + P_{v,i'-t}$$

其中，t: i 小时电动汽车充电负荷叠加次数；

P<sub>v,i'</sub> : 第 i 小时内接入电网电动汽车充电负荷。

显然电动汽车动力电池容量、车辆能效、充电负荷及出行里程都会影响电动汽车充电时间。若车辆日均行驶里程较长，则行驶过程电量消耗较高，电池的起始充电荷电状态较低，相同充电功率下，充电时间就较长。例如，当第 i 小时接入电网的电动汽车的充电小时数为 3，则该小时接入车辆的充电负荷将会延续至第 i+1 和 i+2 小时。本研究假设电池的终止充电荷电状态 SOC 为 90%，则电动汽车充电时间 t 为：

$$t = CEIL \left[ \frac{B \times 90\% \times \left( 1 - \frac{E}{100} \times D \right)}{P_c} \right]$$

其中，B: 动力电池额定容量，取 30 千瓦时；

E: 电动汽车能效，取 15 千瓦时 / 百公里；

D: 电动汽车日行里程；

P<sub>c</sub>: 电动汽车单车充电功率，取 7 千瓦 / 辆。

基于随机充电负荷预测结果，本研究假设有序充电管理对电动汽车充电行为有充分引导：若车辆充电负荷出现在基荷用电低谷，则系统可直接调度车辆充电负荷至低谷时段，而当前小时充电负荷将根据原始负荷与当日平均负荷之间的差值决定，即：

$$P_{v,i'} = \frac{\bar{P} - P_{o,i}}{\sum_i P - P_{o,i}} \times D \times \frac{E}{100}$$

其中， $\bar{P}$  为全天基荷平均负荷。

## 附件 3：上海市居民电价表（分时用户）

档 位	峰谷时段	电价 (元 / 千瓦时)
第一档	峰时段	0.617
	谷时段	0.307
第二档	峰时段	0.677
	谷时段	0.337
第三档	峰时段	0.977
	谷时段	0.487

## 附件 4： 国际电动汽车电网互动示范案例

本章节所有国际案例选自，自然资源保护协会，2016 年 7 月，Creating the Grid-Connected Car, International Experiences Using Demand Response with Electric Vehicles.

### 1 美国圣地亚哥天然气电力公司（SDG&E）电动汽车与电网整合试点项目

圣地亚哥天然气电力公司（SDG&E）是美国加利福尼亚州三大电气公司之一，其开发了一系列项目促进电动汽车和电网的互动。2014 年，SDG&E 公司推出了一项为期 10 年的（2015–2025）电动汽车电网整合试点项目，以减轻电动汽车对电网负面影响、鼓励错峰充电、挖掘其潜在益处并开展实际探索。SDG&E 公司开发了两套具体计划来开展电动汽车电网整合试点项目，分别是电动汽车电网整合可变费率试点项目（SDG&E Application Vehicle Grid Integration Rate Pilot）和优化费率和资源分配项目（SDG&E Optimized Pricing and Resource Allocation Pilot），一些具体的措施包括：

#### （1）新增电动汽车充电设施

在圣地亚哥市，尽管超过 50% 的居民居住在多住户楼宇，目前 88% 的电动车车主住在独栋住宅。为了向楼宇住户普及电动汽车、解决其充电问题，SDG&E 计划在服务区内的工作场所和多住户楼宇建设 3500 座充电站。新建的充电站可为该项目其他部分的规划和执行提供第一手的分析数据。

#### （2）电动汽车充电可变费率

为了鼓励错峰充电，探索电动汽车与需求侧管理整合的潜力，SDG&E 开发了一套电动汽车电网整合（Vehicle Grid Integration, VGI）可变费率机制，参与此费率机制的电动车驾驶员可通过手机应用程序或在网上获知第二天的 VGI 费率安排情况，相应地选择充电时段。理想状态下，由于电网资源稀缺时电费较高，参与者将主动选择错峰充电，以得到较低的电价。SDG&E 计划收集项目运行的数据，藉以研判这一可变费率结构对充电行为的导向作用，进而得知可变费率这一机制对于电网利用效率及电网压力的实际影响。

#### （3）整合电动汽车作为服务提供商

SDG&E 计划选取圣地亚哥县内五个地区作为试点，将电动汽车进行“集成”，并作为一个整体电网资源融入加州电力市场。参与者允许 SDG&E 通过软件远程调整电动汽车的充电时间，提供需求响应。由于承诺不在尖峰时段充电，参与试点的电动汽车可以根据该时段的边际电价得到相应的补偿。此外，SDG&E 也希望能够鼓励电动汽，在电网上存在可再生电力时开始充电，从而更好地消纳可再生能源。

该项目详情请参考：<http://bit.ly/194csaQ>。

### 2 美国太平洋燃气电气公司 - 宝马公司试点项目 i ChargeForward

i ChargeForward 是宝马公司与加州太平洋瓦斯与电力公司（Pacific Gas and Electric, PG&E）的一项合作试点项目。PG&E 是加州最大的私营电力公司（Investor-owned Utility, IOU），也是全美最大的电力公司之一，为加州北部及中部超过 1600 万用户提供电力与天然气。宝马公司作为第三方，将电动汽车用户的电力需求作为响应反馈给电力公司，协助电力公司调度用电。一些具体的实施措施包括：

#### （1）电动汽车用户交流计划

宝马公司邀请了 100 位宝马 i3 电动汽车用户参与一项为期 18 个月的交流计划。当用电高峰期电量供应紧张时，参与者将通过智能手机程序接收到要求他们错峰充电的提示，参与者可以自主决定是否充电。如果参与者接受延迟充电，宝马公司将通过设置在充电设备上的程序远程中止供电。根据推迟充电时间的不同，参与者可以得到价值 1000 美元的宝马公司礼品卡或其他的经济奖励。该项目通过经济激励的方式鼓励用户错峰充电，从而减缓电动汽车充电给电网带来的负荷压力。

#### （2）电动汽车退役电池的利用

宝马展示用电动汽车样车上的蓄电池不但可以正常驱动车辆的行驶，还可以帮助间歇性可再生能源平衡电网负载。因此，该电池可以作为一种电网资源，当用电低谷时吸收富余电能，在用电高峰期时释放电能来维持电网稳定。

该项目详情请参考：<http://www.bmwchargeforward.com>

### 3 美国 NRG 能源公司 - 特拉华大学试点项目 eV2g

由于在美国区域输电组织 PJM 的服务区域内，各州有很多强制性可再生能源上网比例（Renewable Portfolio Standard, PRS），可再生电力势必将快速发展，这也对 PJM 电网运行的稳定性，尤其是交流电的正常运行频率造成不利影响。eV2g 是一项旨在发展商业规模下的电动汽车与电网互助服务，参与该项目的电动汽车用户可以将他们所贮存的电能输回电网，将这部分电能作为一种需求响应，平衡用电紧缺时的电网负载。电力公司会为参与者提供直接的经济补助。该项目的主要利益相关方包括美国 NRG 能源公司，新泽西州发电公司（New - Jersey - based electricity generator）以及特拉华大学（the University of Delaware,UD）。两家电力公司联合创立并经营 eV2gSM 公司，为特拉华大学开发的电动汽车与电网互助项目提供商业化服务。面对技术实施过程中出现的调频服务市场问题，一些关键的解决措施如下：

#### （1）小规模技术试点

特拉华大学在服务区内率先开展了电动汽车与电网互动技术的测试，为一小部分电动汽车装备了双向 V2G 充电设备，并将其用作 PJM 公司电网的资源。2011 年，试点选取了七辆电动汽车和一个大型固定式储能系统参与到 PJM 的调频服务市场。2014 年，电动汽车的数量扩大至九辆，并能在不依靠固定式储能系统的情况下，直接参与到 PJM 的频率调整市场之中。

#### （2）缩减调频发电机组所需的容量

为了使特拉华大学的电动汽车能够直接参与到调频服务市场中，PJM 将最小功率要求从 500 千瓦降低至 100 千瓦，刺激了试点范围内的电动汽车作为电网资源融入到电力市场中。尽管得到了调频服务提供商的支持，特拉华大学开发的新技术对项目的成功仍然显得至关重要。新技术将多辆电动汽车集成为统一的电网资源，允许单一的集成器控制多辆汽车进行充电，这样便于为电力系统调频服务提供一个足够大容量的电网资源。

#### （3）为项目参与者提供汽车租赁服务

试点项目以与其他汽车租赁相似的价格向费城及周边车队所有者出租宝马电动汽车。汽车的租赁方们自动参与到 V2G 试点项目，并被整合入 PJM 区域性的调频服务市场中。在 2012 年试验项目中，除去 V2G 设备安装成本，每台电动汽车的平均盈利超过了 2000 美元。

该项目详情请参考：<http://bit.ly/1FSLzCD>。

### 4 德国宝马公司柏林有序充电试点项目 Charging Berlin Pilot

德国拥有丰富的可再生资源及巨大的电动汽车市场，可再生能源发电在创造巨大环境效益的同时，其间歇性问题也为电网带来了不小的压力。德国汽车制造商宝马公司会同瑞典电力公司 Vatternfall，从 2013 年 3 月起施行了一项为期两年的有序充电试点项目，用以研究电动汽车对促进电网平稳运行与新能源顺利并网起到的作用。一些具体的措施包括：

#### （1）柏林宝马电动汽车用户充电行为试点项目

该项目通过研究小范围内 30 位宝马电动汽车车主的充电行为，测试不同的激励条件对其充电行为的影响。参与者可以通过他们的智能手机程序查阅与利用这些激励条件。宝马公司通过对比过去两年参与者的充电行为数据，发现在激励条件的引导下，参与者有效地利用了电网压力更小、更为理想的时间区间进行充电。然而迄今为止，该试点项目中的收益不足以支撑起一个成熟的商业模式，宝马公司认为引入电动汽车电网互动技术（V2G）可能会为解决这一问题。

#### （2）风 - 车 - 电网联合项目（Wind -to -vehicle -to -grid, W2V2G）

宝马公司在该项目中利用电动汽车作为风电与电网的中间媒介传递电能，提高可再生能源的利用率。用电低谷期产生的风能会被电动汽车贮藏，当遇到用电高峰时期，电动汽车再将这部分电能回馈到电网上。电动汽车为当地负荷管理提供服务，协调电网消纳和利用可再生能源电力。

该项目详情请参考：<http://bit.ly/1SVW26V>



# 参考文献

- <sup>1</sup> 中国汽车工业协会, 2015 年汽车工业经济运行情况 .  
<http://www.caam.org.cn/xiehuidongtai/20160112/1705183569.html>
- <sup>2</sup> 国务院, 《节能与新能源汽车产业发展规划(2012-2020 年)》  
[http://www.gov.cn/zwgc/2012-07/09/content\\_2179032.htm](http://www.gov.cn/zwgc/2012-07/09/content_2179032.htm)
- <sup>3</sup> 财政部, 《关于 2016-2020 年新能源汽车推广应用财政支持政策的通知》  
[http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefagui/201504/t20150429\\_1224515.html](http://jjs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefagui/201504/t20150429_1224515.html)
- <sup>4</sup> 上海市政府办公厅, 《上海市鼓励购买和使用新能源汽车暂行办法(2016 年修订)》  
<http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2319/nw12344/u26aw47043.html>
- <sup>5</sup> 财政部, 《关于免征新能源汽车车辆购置税的公告》  
[http://szs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201408/t20140806\\_1123100.html](http://szs.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/zhengcefabu/201408/t20140806_1123100.html)
- <sup>6</sup> 北京市小客车指标调控管理办公室, 《北京市小客车数量调控暂行规定》  
[http://www.bjhjyd.gov.cn/bszn/20131128/1385625116338\\_1.html](http://www.bjhjyd.gov.cn/bszn/20131128/1385625116338_1.html)
- <sup>7</sup> 国务院, 新能源车不得限行限购  
[http://www.gov.cn/zhengce/2015-09/30/content\\_2941060.htm](http://www.gov.cn/zhengce/2015-09/30/content_2941060.htm)
- <sup>8</sup> 财政部, 2016. 关于“十三五”新能源汽车充电基础设施奖励政策及加强新能源汽车推广应用的通知 .
- <sup>9</sup> 上海市政府办公厅, 《上海市鼓励电动汽车充电设施发展扶持办法》有关解读说明  
<http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw3124/nw18452/nw20020/u21aw1128278.html>
- <sup>10</sup> 公安部交通管理局
- <sup>11</sup> 中国汽车工业协会 . 2015 年 6 月汽车工业经济运行情况 .  
<http://www.caam.org.cn/xiehuidongtai/20150710/1605164888.html>
- <sup>12</sup> Shanghai New-Energy Vehicles Public Data Acquisition and Monitoring Research Center, 2015 上海新能源汽车市场特征与用户行为研究报告  
[http://www.shefdc.org/report/original\\_report/974.jhtml](http://www.shefdc.org/report/original_report/974.jhtml)
- <sup>13</sup> Song YH., Yang YX., Hu ZC., Present Status and Development Trend of Batteries for Electric Vehicles, Power System Technology, Vol. 35 No. 4
- <sup>14</sup> Green, R., L. Wang, M. Alam. "The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook". Renewable Sustainable Energy Review, 15 (2011), pp. 544-553
- <sup>15</sup> Fernandez, L. Pieltain, T. Gomez San Roman, R. Cossent, C. Mateo Domingo and P. Frias, "Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 206-213, Feb. 2011.
- <sup>16</sup> Putrus, G. A., P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E. C. Bentley and M. Narayana, "Impact of electric vehicles on power distribution networks," 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Dearborn, MI, 2009, pp. 827-831.
- <sup>17</sup> Hajimiragha, A., C. Cañizares, M. Fowler, S. Moazeni, A. Elkamel. "A robust optimization approach for planning the transition to plug-in hybrid electric vehicles." IEEE Transactions on Power Systems, 26 (2011), pp. 2264-2274
- <sup>18</sup> Kristofferson, T., K. Capion, P. Meibom. "Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment". Applied Energy, 88 (2011), pp. 1940-1948
- <sup>19</sup> Denholm, Paul. (2013) "Flexibility Options for VG Integration- Lessons from High Resolution Operational and Capacity Expansion Models." Presentation at Stanford Energy Modeling Forum Climate Change Impacts and Integrated Assessment (CCIA) Workshop on July 22, 2013. [https://web.stanford.edu/group/emf-research/docs/CCIA/2013/7-22/Paul\\_Denholm\\_7.22\\_PM.pdf](https://web.stanford.edu/group/emf-research/docs/CCIA/2013/7-22/Paul_Denholm_7.22_PM.pdf)
- <sup>20</sup> Kintner-Meyer, M., K. Scheider, R. Pratt. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part 1: technical analysis. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (2007)
- <sup>21</sup> Clement-Nyns, K., E. Haesen and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, Feb. 2010.
- <sup>22</sup> Lund H, Kempton W. Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. Energy Policy 2008; 36(9):3578 – 87.
- <sup>23</sup> Kempton W, Tomic J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. J Power Sources 2005; 144 (1):280-94.
- <sup>24</sup> Pearrea N, Kempton W, Guensler R, Elango V, Electric vehicles: How much range is required for a day's driving? , Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2011, Volume 19, Issue 6, Pages 1171-118
- <sup>25</sup> Shao, Shengnan, Manisa Pipattanasomporn, Saifur Rahman. (2011) "Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid with Electric Vehicles." IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 2, No. 4. 624 – 631.
- <sup>26</sup> Morais, H., T. Sousa, J. Soares, P. Faria, Z. Vale, Distributed energy resources management using plug-in hybrid electric vehicles as a fuel-shifting demand response resource, Energy Conversion and Management, Volume 97, June 2015, Pages 78-93
- <sup>27</sup> Papadaskalopoulos, Dimitrios, Goran Strbac, Pierluigi Mancarella, Marko Aunedi, and Vojislav Stanojevic. "Decentralized participation of flexible demand in electricity markets—Part II: Application with electric vehicles and heat pump systems." IEEE Transactions on Power Systems, 28, no. 4 (2013): 3667-3674.
- <sup>28</sup> Tan, Zhao, Peng Yang, and Arye Nehorai. "An optimal and distributed demand response strategy with electric vehicles in the smart grid." Smart Grid, IEEE Transactions on 5, no. 2 (2014): 861-869.
- <sup>29</sup> Rassaei, Farshad, Wee-Seng Soh, and Kee-Chaing Chua. "Demand response for residential electric vehicles with random usage patterns in smart grids." IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6, no. 4 (2015): 1367-1376.
- <sup>30</sup> 上海市公安局交通警察总队统计, <http://shanghai.xinmin.cn/msrx/2016/02/25/29560741.html>
- <sup>31</sup> 上海市发改委 . 上海市电动汽车充电基础设施专项规划 (2016-2020)  
<http://jt.sh.cn/Attach/Attaches/201606/201606170458165302.pdf>
- <sup>32</sup> 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会 . 电动汽车传导充电用连接装置 .  
[http://www.catac.org.cn/Upload/file/bzyj/PDF/zhengqiuqijian-sc27-37.1\(1\).pdf](http://www.catac.org.cn/Upload/file/bzyj/PDF/zhengqiuqijian-sc27-37.1(1).pdf)
- <sup>33</sup> 中国能源年鉴 2015.
- <sup>34</sup> 国家电网公司, <http://www.sgcc.com.cn/xwzx/gsxw/2015/08/327997.shtml>
- <sup>35</sup> 上海市统计局, <http://www.stats-sh.gov.cn/tjnj/nj15.htm?d1=2015tjnj/C0611.htm>
- <sup>36</sup> 上海市人民政府办公厅, 《私人购买新能源汽车试点财政补助资金管理暂行办法》
- <sup>37</sup> 国家发改委能源研究所, 《中国 2050 高比例可再生能源发展情景暨途径研究》 <http://www.efchina.org/Reports-zh/china-2050-high-renewable-energy-penetration-scenario-and-roadmap-study-zh>

- <sup>38</sup> Shepard, Scott and John Garter. 2014. Electric Vehicle Geographic Forecasts: Plug-In Electric Vehicle Sales Forecasts for North America and Select European and Asia Pacific Cities by State/Province, Metropolitan Area, City, and Selected Utility Service Territories. Boulder, CO: Navigant Consulting, Inc.
- <sup>39</sup> Kintner-Meyer, M., K. Scheider, R. Pratt. Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids part 1: technical analysis. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA (2007)
- <sup>40</sup> Hadley, Stanton W. and Alexandra Tsvetkova. (2008) Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- <sup>41</sup> 中国电力科学院, 《智能电网与电动汽车》. 2014年. 北京: 中国电力出版社.
- <sup>42</sup> 国家电网公司营销部, 《电动汽车充换电服务网络建设与运营》. 2013年. 北京: 中国电力出版社.
- <sup>43</sup> 黄梅, 黄少芳, 姜久春, 电动汽车充电机(站)接入电力系统的谐波分析, 《北京交通大学学报: 自然科学版》, 2008年第5期.
- <sup>44</sup> 李娜, 黄梅, 不同类型电动汽车充电机接入后电力系统的谐波分析, 《电网技术》, 2011年第01期.
- <sup>45</sup> 黄梅教授电动汽车充电设施问题访谈, 2014年3月14日于北京交通大学。
- <sup>46</sup> Kristofferson, T., K. Capion, P. Meibom. "Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment". Applied Energy, 88 (2011), pp. 1940–1948
- <sup>47</sup> Hajimiragha, A., C. Cañizares, M. Fowler, S. Moazeni, A. Elkamel. "A robust optimization approach for planning the transition to plug-in hybrid electric vehicles." IEEE Transactions on Power Systems, 26 (2011), pp. 2264–2274
- <sup>48</sup> Stroehle, P., S. Becher, S. Lamparter, A. Schuller and C. Weinhardt, "The impact of charging strategies for electric vehicles on power distribution networks," 2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM), Zagreb, 2011, pp. 51-56.
- <sup>49</sup> Clement-Nyns, K., E. Haesen and J. Driesen, "The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, Feb. 2010.
- <sup>50</sup> Shao, Shengnan, Manisa Pipattanasomporn, Saifur Rahman. (2011) "Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid with Electric Vehicles." IEEE Transactions on Smart Grid. Vol. 2, No. 4. 624-631.
- <sup>51</sup> Morais, H., T. Sousa, J. Soares, P. Faria, Z. Vale, Distributed energy resources management using plug-in hybrid electric vehicles as a fuel-shifting demand response resource, Energy Conversion and Management, Volume 97, June 2015, Pages 78-93
- <sup>52</sup> Papadaskalopoulos, Dimitrios, Goran Strbac, Pierluigi Mancarella, Marko Aunedi, and Vojislav Stanojevic. "Decentralized participation of flexible demand in electricity markets—Part II: Application with electric vehicles and heat pump systems." IEEE Transactions on Power Systems, 28, no. 4 (2013): 3667-3674.
- <sup>53</sup> Tan, Zhao, Peng Yang, and Arye Nehorai. "An optimal and distributed demand response strategy with electric vehicles in the smart grid." Smart Grid, IEEE Transactions on 5, no. 2 (2014): 861-869.
- <sup>54</sup> Rassaei, Farshad, Wee – Seng Soh, and Kee-Chaing Chua. "Demand response for residential electric vehicles with random usage patterns in smart grids." IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6, no. 4 (2015): 1367-1376.
- <sup>55</sup> Nexant, Final Evaluation for San Diego Gas & Electric's Plug-in Electric Vehicle TOU Pricing and Technology Study.
- <sup>56</sup> 向家坝水电与沪电网跨区辅助服务补偿成效显著, 中电新闻网 .  
[http://www.cpn.com.cn/zdzt/201512/t20151210\\_860057.html](http://www.cpn.com.cn/zdzt/201512/t20151210_860057.html)
- <sup>57</sup> 比亚迪秦 EV300. <http://www.byd.com.cn/car-show-qinev300.html>
- <sup>58</sup> W. Kempton, S. E. Letendre. Electric vehicles as a new power source for electric utilities. Journal of power sources, 1997, 2(3): 157-175.
- <sup>59</sup> W. Kempton, J. Tomic. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. Journal of power sources, 2005, 144(1): 280-294.
- <sup>60</sup> W. Kempton, J. Tomic. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. Journal of power sources, 2005, 144(1): 268-279.
- <sup>61</sup> J. Tomic, W. Kempton, Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. Journal of Power Sources, 2007, 168(2): 459-468.
- <sup>62</sup> W. Kempton, J. Tomic. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. Journal of power sources, 2005, 144(1): 268-279.
- <sup>63</sup> J. Tomic, W. Kempton, Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. Journal of Power Sources, 2007, 168(2): 459-468.
- <sup>64</sup> B. D. Williams, K. S. Kurani. Commercializing light-duty plug-in/plug-out hydrogen fuel cell vehicles: "Mobile Electricity" technologies and opportunities. Journal of Power Sources 2007, 166: 549–566.
- <sup>65</sup> A. N. Brooks. Vehicle-to-Grid Demonstration Project: Grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle. AC Propulsion, San Dimas, CA.
- <sup>66</sup> E. Larsen, D. K. Chandrashekhara, O. sterg. Electric vehicles for improved operation of power systems with highwind power penetration. IEEE Energy 2030, Atlanta, GA, US, 2008.
- <sup>67</sup> C. Camus, J. Esteves, T. L. Farias. Electric vehicles and the electricity sector regulatory framework: The Portuguese example. Electric vehicle symposium 24, Stavanger, Norway, 2009.
- <sup>68</sup> W. Kempton, J. Tomic. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue. Journal of power sources, 2005, 144(1): 268-279
- <sup>69</sup> J. Tomic, W. Kempton, Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. Journal of Power Sources, 2007, 168(2): 459-468.
- <sup>70</sup> 国家能源局, “深圳模式” 给力纯电动汽车发展  
[http://www.nea.gov.cn/2012-09/05/c\\_131828199.htm](http://www.nea.gov.cn/2012-09/05/c_131828199.htm)
- <sup>71</sup> 德国国际合作机构 GIZ, 汽车共享在中国 – 对可持续城市交通的贡献? 2014年10月.
- <sup>72</sup> 杭州微公交, <http://www.myhz.com/?p=97>
- <sup>73</sup> 上海市发改委等, 《上海市鼓励电动汽车充换电设施发展扶持办法》
- <sup>74</sup> 国务院办公厅, 《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》
- <sup>75</sup> 国家发改委, 《关于电动汽车用电价格政策有关问题的通知》