



世界资源研究所  
WORLD RESOURCES INSTITUTE

新能源汽车如何更友好地接入电网

HOW DO ELECTRIC VEHICLES FRIENDLY INTERACT WITH THE ELECTRIC GRID

# 中国新能源汽车规模化 推广对电网的影响分析

QUANTIFYING THE GRID IMPACTS FROM LARGE ADOPTION  
OF ELECTRIC VEHICLES IN CHINA


---

薛露露 夏俊荣 禹如杰 任焕焕 刘勇 韦围 刘鹏

---

WRI.ORG.CN





《新能源汽车如何更友好地接入电网》系列旨在探讨中国新能源汽车与能源（电网）融合发展的必要性与路线图。该研究系列由两篇报告组成。《新能源汽车规模化推广对电网的影响》为系列一。

校对：谢亮  
hippie@163.com

设计：张焱  
harryzy5204@gmail.com



# 目录

2	图目录
4	表目录
5	词汇表
7	执行摘要
13	Executive Summary
19	第 1 章 中国新能源汽车的未来推广趋势
23	第 2 章 电动汽车规模化推广对电网的潜在影响
31	第 3 章 中国典型城市出行与充电行为分析
43	第 4 章 模型方法
43	宏观模型与微观模型
44	蒙特卡洛随机模拟
50	模型假设
53	第 5 章 电动汽车无序充电对电网的影响
53	宏观层面：无序充电对电网的影响
67	微观层面：无序充电对配电网的影响
77	第 6 章 电动汽车与电网协同的潜力分析
78	有序充电的潜力分析
81	双向充放电的潜力分析
85	第 7 章 结论与建议
90	参考文献
91	注释

## 图目录

图 1	中国新能源汽车年销量和保有量 (单位: 万辆)	19
图 2	本研究不同情景下纯电动乘用车保有量增长情况 (单位: 百万辆)	20
图 3	电动汽车规模化推广对发电、输电、配电和供电的影响	23
图 4	中国2012-2017年区域电网最高负荷占总装机量比例	24
图 5	电动汽车与电网协同方式类型与本文范畴	25
图 6	电动汽车对电网影响与本文研究范畴	28
图 7	电动汽车单车无序充电对电网的影响因素	31
图 8	本研究抽取的私家电动汽车出行和充电行为的城市及基本情况	32
图 9	各城市私家电动汽车日行驶里程分布图 (单位: 归一化的出行次数占比)	33
图 10	典型中国城市私家电动汽车充电频次分布 (单位: 归一化的充电频次占比)	34
图 11	私家电动汽车充电开始时间 (全年) 日平均分布图 (单位: 归一化的充电频次占比)	35
图 12	苏州、北京私家电动汽车慢充和快充的充电开始时间分布图 (单位: 归一化的充电频次占比)	35
图 13	北京私家电动汽车快、慢充电起始SOC分布 (单位: 归一化的充电频次占比)	36
图 14	私家电动汽车充电终止SOC分布 (纵轴单位: 归一化的充电频次占比)	37
图 15	北京私家电动汽车快充、慢充充电终止SOC分布 (纵轴单位: 归一化的充电频次占比)	37
图 16	典型中国城市私家电动汽车慢充充电次数占比 (单位: 各城市归一化的充电频次占比)	39
图 17	无序充电推导过程示意	45
图 18	协同策略中的全局优化与局部优化	45
图 19	协同策略推导过程示意	46
图 20	宏观模型流程图	47
图 21	微观模型流程图	48
图 22	充电桩数量充足与不足条件下电动汽车充电负荷曲线示意图	49
图 23	北京市2050年乘用车分车龄保有结构预测	56
图 24	苏州市2050年乘用车分车龄保有结构预测	56
图 25	中国城市未来快充发展趋势分类	57
图 26	北京、苏州未来快充比例预测 (仅含乘用车和出租车)	58
图 27	北京2050年基准、激进情景下分车型电动汽车充电负荷 (单位: kW)	60
图 28	北京2050年电动汽车充电负荷在基准与激进情景下的比较 (单位: MW)	60
图 29	北京: 2050年基准、激进情景夏季总负荷 (单位: MW)	61
图 30	苏州2050年基准、激进情景下分车型电动汽车充电负荷 (单位: kW)	62
图 31	苏州2050年电动汽车充电负荷在基准与激进情景下的比较 (单位: MW)	63
图 32	苏州2050年基准、激进情景下夏季总负荷 (单位: MW)	64
图 33	基准和激进情景北京和苏州电动汽车的日用电量将占全社会夏季日用电量比例	65
图 34	基准和激进情景下北京和苏州受电动汽车充电影响全网峰值负荷变化 (单位: MW和%)	66
图 35	本研究2035年预测结果与现有文献比较——电力峰值负荷增加比例 (单位: %)	67
图 36	北京市不同类型车辆的充电量热力图	67

图 37	城市不同微观场景：工作日日负荷曲线示意 .....	69
图 38	城市不同微观场景：电动汽车充电开始时间示意（单位：辆） .....	70
图 39	微观场景充电负荷的随机性以及本研究对微观场景下充电行为的假设 .....	70
图 40	不同同时率下住宅小区总负荷曲线（单位：kW） .....	71
图 41	不同同时率下办公场所总负荷曲线（单位：kW） .....	72
图 42	商场场景下总负荷曲线 .....	73
图 43	不同充电功率下办公场所总负荷曲线（充电同时率：15%） .....	74
图 44	100%电动化水平下，充电随机性导致的用电总负荷变化（单位：kW） .....	75
图 45	居住小区优化后负荷：不同有序充电措施的削峰填谷效果 .....	79
图 46	单车参与有序充电的不同负荷曲线（单位：kW） .....	79
图 47	居住小区优化后负荷：不同双向充放电（V2G）参与程度下的削峰填谷效果 .....	81
图 48	单车参与双向充放电的不同负荷曲线（单位：kW） .....	82
图 49	参与双向充放电所有车辆的V2G负荷曲线（单位：kW） .....	82
图 50	不同电动汽车参与度下，单车双向充放电负荷曲线比较（单位：kW） .....	83

## 表目录

---

表 1	本研究宏观模型与微观模型差异对比 .....	44
表 2	北京和苏州不同情景下的新能源汽车政策 .....	55
表 3	北京和苏州2035年和2050年不同情景下新能源汽车各车型保有量（单位：万辆） .....	55
表 4	本研究宏观模型中未来私家电动汽车主流充电功率假设 .....	57
表 5	本研究宏观模型中对未来充电规律的假设 .....	59
表 6	北京2035年和2050年电动汽车日用电量预测（单位：兆千瓦时） .....	59
表 7	苏州2035年和2050年不同情景下的电动汽车日用电量（单位：兆千瓦时） .....	62
表 8	城市微观层面不同场景分类与特点 .....	69
表 9	不同电动汽车渗透率、同时率下住宅小区配变负荷特征 .....	72
表 10	不同电动汽车渗透率、同时率下办公场所配变负荷特征 .....	73
表 11	不同电动汽车渗透率、同时率下商场配变负荷特征 .....	74
表 12	电动汽车和电网协同的优化目标设定 .....	77
表 13	不同微观场景下的充电可调节性 .....	78
表 14	不同电动汽车与电网协同措施的比较 .....	86
表 15	北京和山东城市住宅小区配电标准 .....	87

## 词汇表

---

<b>新能源汽车</b>	包含纯电动汽车、插电式混合动力汽车和氢燃料电池汽车，不含混合动力汽车。
<b>电动汽车</b>	指纯电动汽车。
<b>乘用车</b>	指9座及9座以下乘用车，对应国家标准中的M1类，包括轿车、交叉型乘用车等。根据用途不同，乘用车包括私家车、出租车、公务用车等。
<b>电动汽车无序充电</b>	指电动汽车用户随时、随地和随机进行充电，不对充电时间和充电功率进行引导与控制。
<b>电动汽车单向有序充电</b>	简称“有序充电”，指在满足电动汽车充电需求的前提下，运用峰谷电价的经济措施或者智能控制措施，优化调整电动汽车充电时序与功率。
<b>电动汽车双向充放电 (V2G)</b>	指在满足电动汽车充电需求的前提下，将电动汽车视作储能设施，当电网负荷或本地负荷过高时，由电动汽车向电网或本地负荷馈电；当电网负荷或本地负荷过低时，可通过有序充电，调整本地负荷的峰谷差。
<b>电池荷电状态 (SOC)</b>	指电池剩余容量与其额定容量的比值。
<b>电动汽车起始充电荷电状态 (SOC)</b>	指电动汽车在充电开始时刻，动力电池的剩余电量与其额定容量的比值。
<b>电动汽车终止充电荷电状态 (SOC)</b>	指电动汽车在充电结束离网时刻，动力电池的剩余电量与其额定容量的比值。
<b>配电网</b>	指电压等级低于110kV的线路与设施，旨在按电压等级，将电能分配到各类电力用户。
<b>配电变压器</b>	简称“配变”，指运行在配电网中终端用户的电力变压器，与配电线路一样，配变是电力增容的主要对象。







# 执行摘要

## 主要结论

- 中国电动汽车规模化推广带来的用电量与用电负荷增长，对发电侧、输电侧、配电侧、供电侧，以及充电桩规划布局都有着深远影响。
- 在城市层面，由于不同城市在车辆电动化的进展与充电模式上的差异，电动汽车对电网的影响呈现不同结果：只有当城市新能源汽车数量增长提速且快充占比相对较高时，可能使部分地区的电源装机容量、输电线路容量出现缺口。
- 在配电网层面，配电变压器受到电动汽车无序充电的影响在幅度上大于电动汽车在城市层面的影响。当私家车电动化比例超过50%时，多数配电变压器将面临超载风险。其中，居民小区、安装快充公共桩的场所，以及本身变压器中载或重载的配变，最易受影响。
- 单纯增容配变未必能满足电动汽车无序充电的需求，反而会增加社会对电力资产的投入，降低资产的利用率。因此，有必要优先考虑电动汽车与电网协同措施——电动汽车双向充放电、基于智能控制的有序充电和基于峰谷电价的有序充电，让电动汽车能够更友好地接入电网。
- 综合考虑不同电动汽车与电网协同措施的削峰填谷效果和实施难度，利用智能控制的有序充电措施降低配电网增容投资，已成为必然选择。因此，有必要克服基于智能控制的有序充电在商业模式、技术标准上的阻碍，实现其近期的规模化推广。

新能源汽车的推广对中国交通行业温室气体减排和空气污染物防控具有积极意义。中国作为全球新能源汽车最大的市场，近年来新能源汽车增长势头强劲。截至2018年底，中国市场的新能源汽车总保有量约为261万辆，占全球新能源汽车的47%。根据中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心预测（2019），在基准情景下，2050年中国乘用车市场中，纯电动乘用车的保有量将达到2.3亿辆（占比为50.1%）；在激进情景下，乘用车市场中纯电动汽车保有量将在2050年上升至3.5亿辆（占比为75.8%）。

中国电动汽车规模化的快速增长，将带来车用用电量与用电负荷的增长，成为未来用电负荷增长的重要助推力之一，对发电侧、输电侧、配电侧与供电侧均带来挑战。

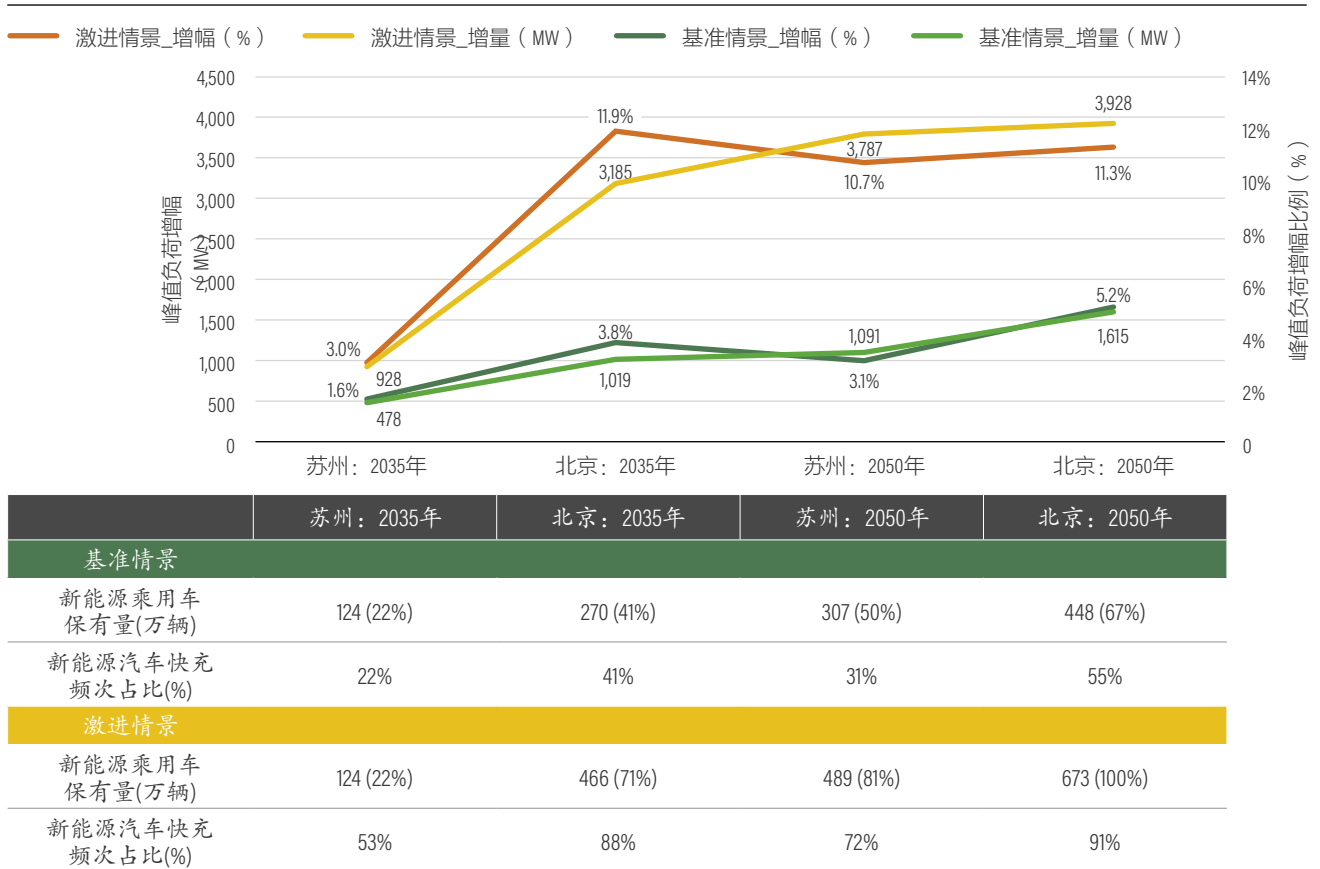
为协助电网企业、能源部门分析电动汽车规模化普及对发电侧宏观与配电侧微观的负荷影响，本文建立宏观、微观的蒙特卡洛随机模拟模型，以未来车辆规模、电动汽车充电和出行规律的大数据分析结果为模型输入，对未来不同情景下电动汽车对城市电网的发电量、用电负荷、配电网负载的

影响进行评估。在此基础上，本文建立线性优化模型，测算不同电动汽车与电网协同策略（即单向有序充电和双向充放电）对减少电动汽车对电网的冲击所发挥的作用。

模型结果显示，在宏观层面，电动汽车对电网的影响具有明显的“本地化”特征。本文选择中国两个有代表性的城市进行分析。第一个城市为北京，代表电动汽车规模大、市场占有率高，充电以公共快充为主的城市；另一个城市为苏州，代表新能源汽车规模中等，充电以私人慢充为主的城市。鉴于两个中国城市在电动化路径与充电模式（快充、慢充）的选择上存在差异，电动汽车对电网的影响呈现不同结果，从无显著影响，到对电源装机容量、输电线路容量均产生显著影响（图ES-1）：

- 当城市新能源汽车数量增长速度维持现有水平（2035年新能源汽车保有量在300万辆以内，2050年在450万辆以内），且慢充占比相对较高时：2035年和2050年城市电网峰值负荷的增幅均在1%~5%之间，最大负荷需求在500~1100MW之间；该增幅在部分城市可以被电源

图 ES-1 | 基准和激进情景下北京和苏州受电动汽车充电影响全网峰值负荷变化（单位：MW和%）



说明：括号中的比例为新能源乘用车保有量在乘用车保有量中的占比。  
数据来源：本研究计算

侧富余的装机容量消化。

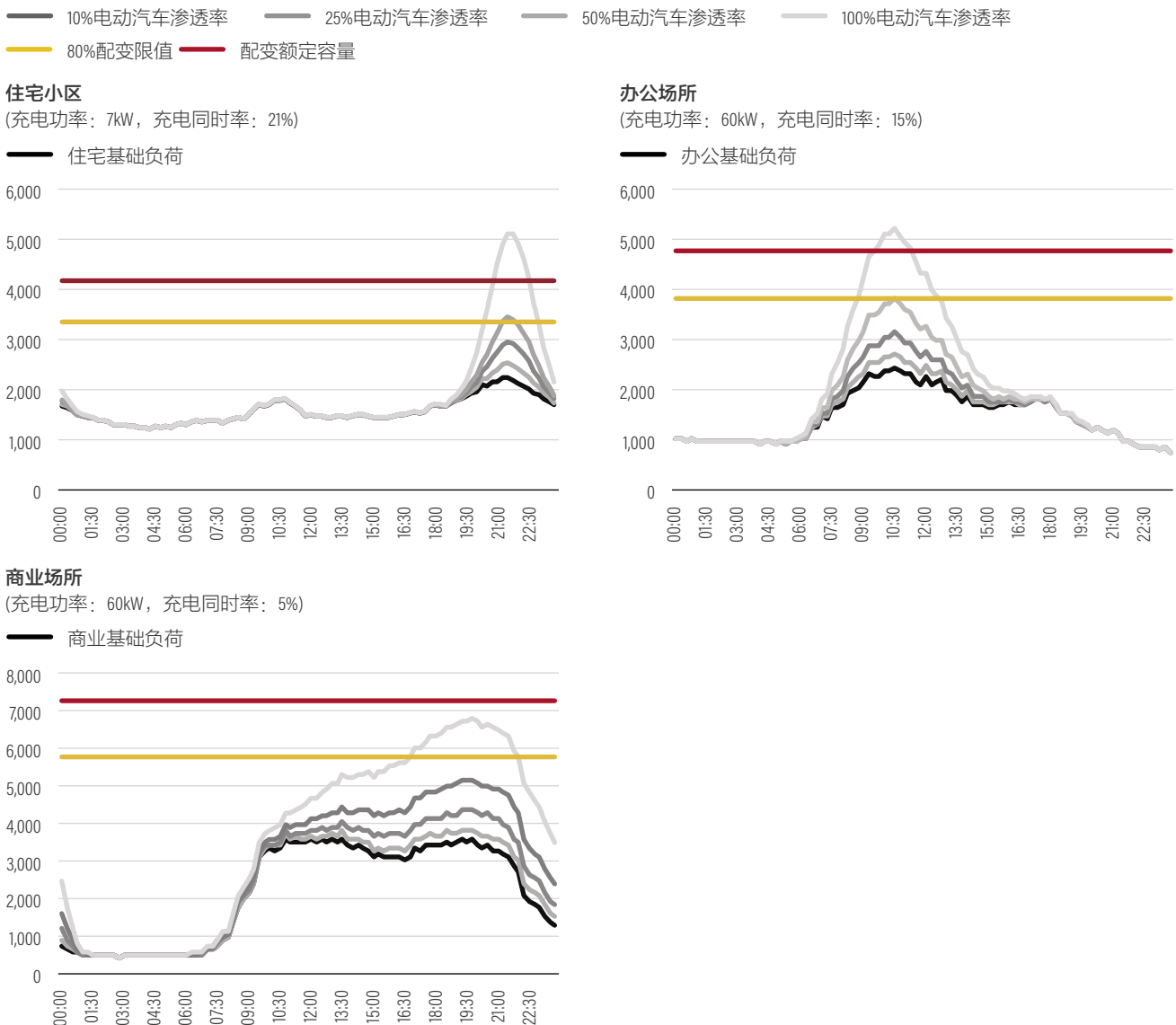
- 当城市新能源汽车数量增长加速（2035年新能源汽车保有量超过300万辆，2050年超过450万辆），且快充占比相对较高时，2035年和2050年城市电网峰值负荷的增幅均在10%~11%左右，最大负荷需求均在1000~4000MW之间；该增幅在极端情况下可能使部分地区的电源装机容量、输电线路容量出现缺口。此外，快充的普及不仅将增加电网负荷，也增加电动汽车负荷的复杂性与不确定性（即快充充电时间、充电同时率的不确定性）。

因此，各城市需要结合自身发展路径，采取差异化的

措施。此外，鉴于大功率快充对电网宏观和微观层面的负面影响较大——不仅将增加电网负荷，也增加电动汽车负荷的复杂性与不确定性，其推广规模需谨慎研究。

在微观层面，局部配电系统受到无序充电的影响在幅度上大于电动汽车对全网的影响，在时间上也更迫切。在局部配电网中，当私家车电动化比例超过50%时，多数配电变压器（以下或简称“配变”）将面临超载风险。除了公交车、物流车等需要专用配变的场景外，可能受到电动汽车无序充电影响、近期需优先考虑增容的配网系统还包括居民小区、安装快充公共桩的场所，以及本身变压器中载或重载的配变（图ES-2）。

图 ES-2 | 住宅、办公和商业场景下电动汽车充电对配变的影响（单位：kW）



数据来源：本研究计算



分析也显示，有必要优先考虑电动汽车与电网协同措施，通过需求管理手段，让电动汽车能够更友好地接入电网。单纯增容配变未必能满足电动汽车无序充电的需求。随着电动汽车规模增大，充电随机性（即充电同时率）的微小扰动会造成本地充电需求与负荷峰值发生剧烈变化；因此，任由电动汽车进行无序充电而不采取任何需求侧管理措施，可能让规划未来配变容量变得更加困难。另外，无止境地增加配变容量也会增加全社会投入，而由于无序充电加剧的本地负荷峰谷差也让存量电力资产无法得到高效利用。在一些老旧住宅小区，配电网增容更面临着用地空间的约束。

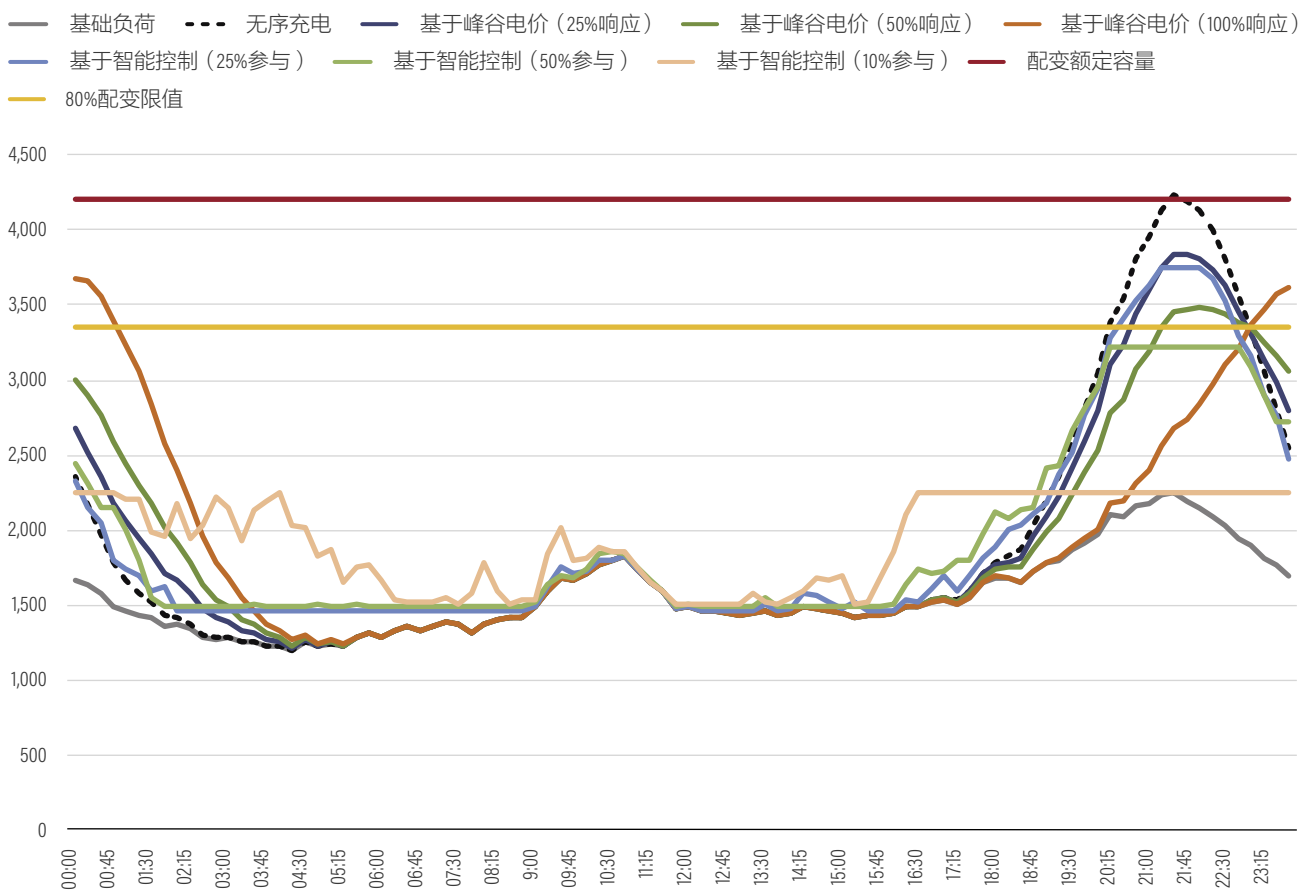
从削峰填谷作用上看，电动汽车双向充放电的效果 > 基于智能控制的有序充电的效果 > 基于峰谷电价的有序充电的效果（图ES-3和图ES-4）。其中，电动汽车双向充放电能够通过调动少数电动汽车，实现比有序充电更理想的“削峰填谷”效果（图ES-4）。而在有序充电措施中，单纯基于峰谷电价机制的有序充电虽然在一定程度上能够转

移并降低充电负荷峰值，但“削峰填谷”的效果有限，还可能在深夜电价谷时的开始时刻，形成另一个充电负荷峰值（图ES-3）。

随着电动汽车的推广应用，城市相关部门应及早编制规划、采取措施，化解电动汽车对电网的冲击。在近期，通过峰谷电价和智能控制有序充电机制实现削峰填谷、降低配电网增容投资，已成为必然选择（图ES-5）。而鉴于智能有序充电更理想的削峰填谷效果，有必要克服其商业模式、技术标准的阻碍，实现其近期的规模化推广。在中长期，随着电动汽车放电逐渐克服技术标准、并网许可及商业模式等方面的阻碍，可以以营运车队（如城市物流货运车队、企事业单位车队、出租租赁车队等）为试点，小范围地推广电动汽车双向充放电。

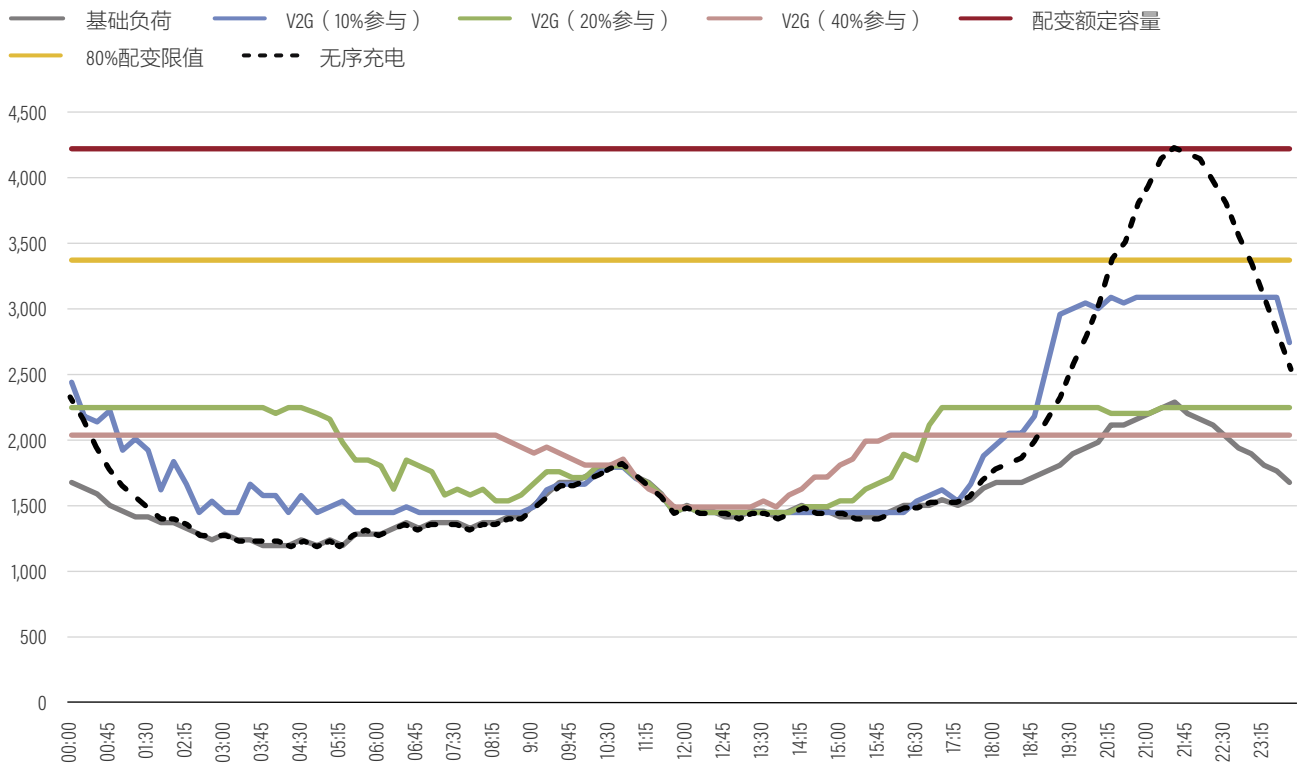
针对实现电动汽车与电网协同措施所需的制度、技术、资金投入与公众接受度保障，感兴趣的读者可阅读本系列研究的第二篇——《中国电动汽车和电网协同路线图研究》。

图 ES-3 | 住宅小区优化后负荷：两种有序充电措施的削峰填谷效果（电动化比例100%，单位：kW）



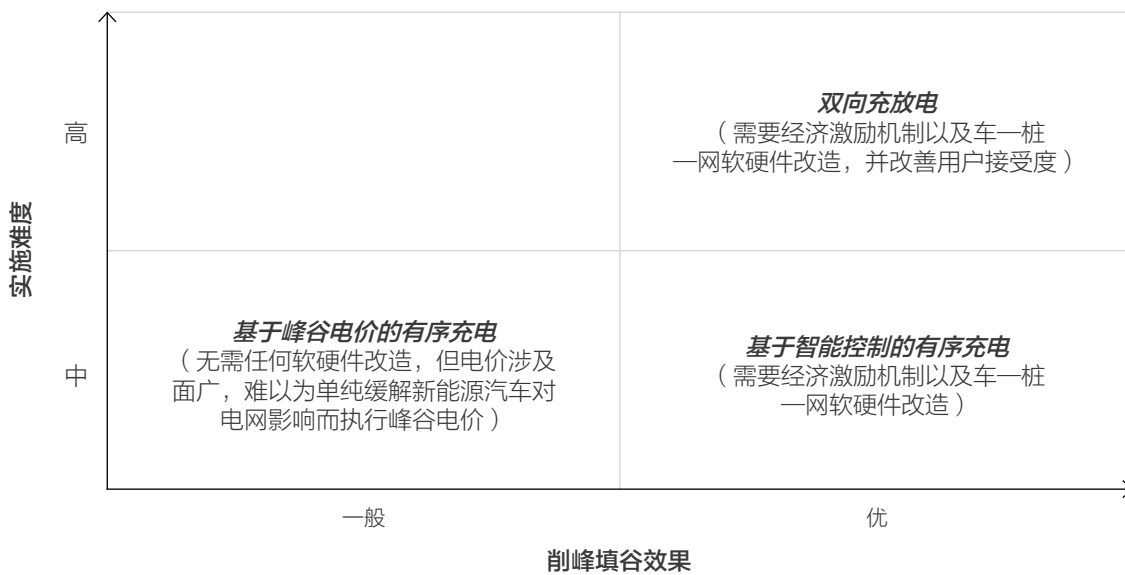
数据来源：本研究计算

图 ES-4 | 住宅小区优化后负荷：双向充放电（V2G）措施削峰填谷的效果（电动化比例100%，单位：kW）



数据来源：本研究计算

图 ES-5 | 不同电动汽车与电网协同措施的效果与实施难度







# EXECUTIVE SUMMARY

China is the frontrunner of the global plug-in electric vehicle (PEV) market. The rapid and widespread uptake of PEVs and fast charging technologies will have a significant impact on power generation and distribution systems.

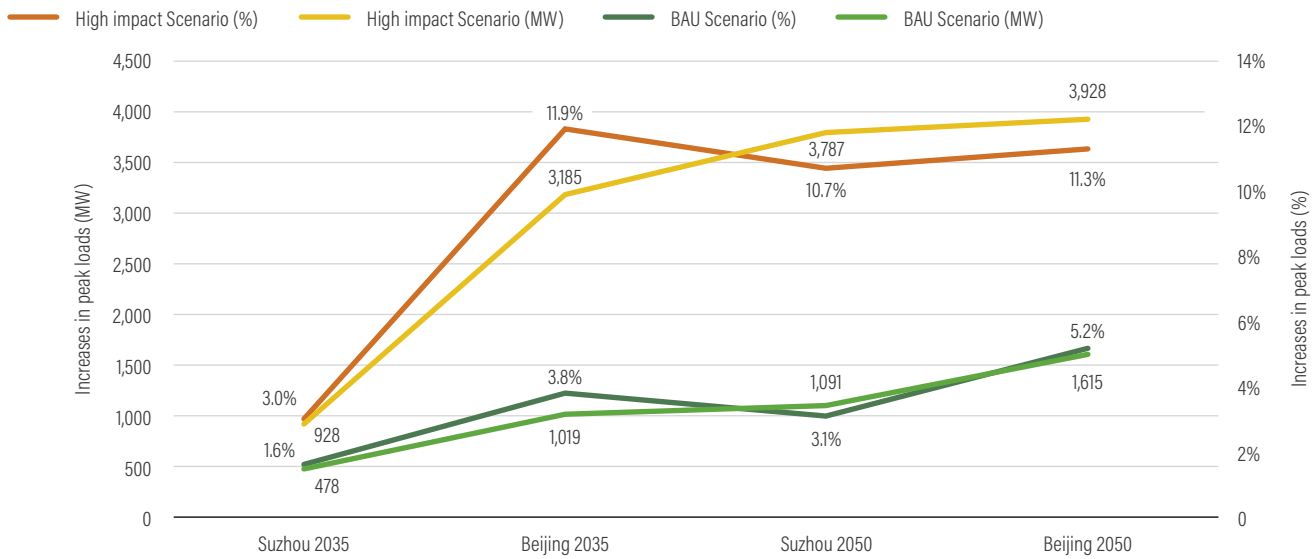
However, PEVs could potentially not only draw power from the grid as a load, they could also act as storage systems. By leveraging storage capacity of PEVs, their impact on the grid system can be minimized through Vehicle-Grid Integration (VGI) measures such as vehicle to grid (V2G) and managed charging.

In this study, we have adopted a quantitative model to quantify the impact that unmanaged PEV charging will have on the grid system and to what extent this impact can be minimized by VGI measures. Using the Monte Carlo Simulation, the study analyzes PEVs' impact on the city level and distribution level. Combining Monte Carlo Simulation and Linear Programming, the model further investigates whether VGI measures are sufficient to mitigate PEVs' impacts on the distribution level.

Results based on this model in Beijing and Suzhou reveal that on the city level, the impact of PEVs on the grid varies greatly depending on the level of PEV stocks and the adoption of ultra-fast charging (Figure ES-1):

- In the Business-as-usual (BAU) Scenario, cities witness a moderate pace of PEV growth (PEV stock within 3 million by 2035 or 4.5 million by 2050) with the majority of its PEVs relying on slow charging, increases in the peak load between 2035 and 2050 will range between 1-5%. This increased demand could be possibly accommodated by the existing generation and transmission capacities.
- In the High-impact Scenario, cities experience an accelerated pace of PEV growth (PEV stock larger than 3 million by 2035 or 4.5 million by 2050) with the majority of PEVs relying on fast charging, EV's charging will result in nearly 12% increases in the peak load in 2035 and 2050, possibly overstressing the generation and transmission systems.

**Figure ES-1 | Peak load increases from PEV charging in the BAU and High-impact Scenarios (Unit: MW and %)**



	Suzhou 2035	Beijing 2035	Suzhou 2050	Beijing 2050
<b>Business-as-usual Scenario</b>				
Ownership of PEVs (10,000 units)	124 (22%)	270 (41%)	307 (50%)	448 (67%)
Fast charging ratio (%)	22%	41%	31%	55%
<b>High-impact Scenario</b>				
Ownership of PEVs (10,000 units)	124 (22%)	466 (71%)	489 (81%)	673 (100%)
Fast charging ratio (%)	53%	88%	72%	91%

Source: calculated by this study

On the distribution scale, the impact of unmanaged charging is even greater. When electrification of private vehicles exceeds 50%, the majority of transformers in residential neighborhoods risk being overloaded. With the exception of bus or freight depots, which require their own dedicated transformers, areas affected by unmanaged charging of PEVs and that may require transformer capacity expansion include commercial and office complexes with fast chargers (Figure ES-2). This last-mile grid challenge will constrain the deployment of charging infrastructure and potentially backfire on PEVs promotion.

Furthermore, the results show that VGI measures such as managed charging and vehicle discharging to grid (vehicle-to-grid, V2G) can effectively eliminate the needs for distribution capacity expansion. In contrast, simply increasing capacity to satisfy the ‘unreasonable’ demand of unmanaged charging by PEVs will increase cost and may very easily face restrictions.

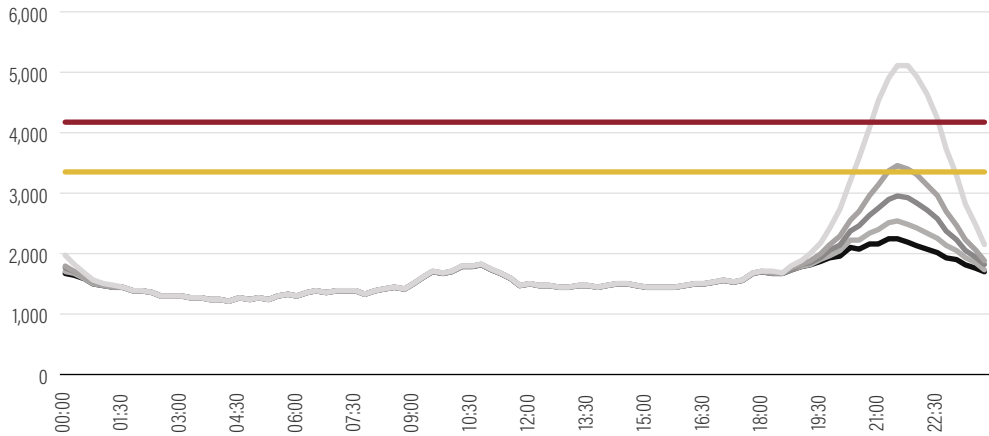
Between two VGI measures, V2G is most effective in shaving the local peak loads. V2G can use a small number of PEVs to shave peak loads, which is even more ideal than managed charging. Within

**Figure ES-2 | Load impacts on transformers in residential, office, and commercial neighbourhoods (unit: kW)**

— Base load   
 — 10% vehicle electrification   
 — 25% vehicle electrification   
 — 50% vehicle electrification  
— 100% vehicle electrification   
 — Rated capacity of transformer   
 — Maximum efficiency (80%)

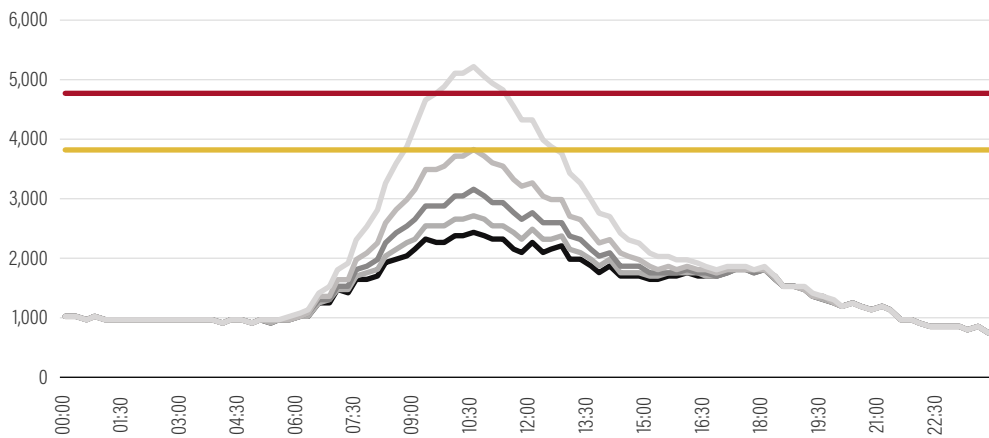
**Residential neighbourhood**

(Charging power: 7kW, Coincidence factor: 21%)



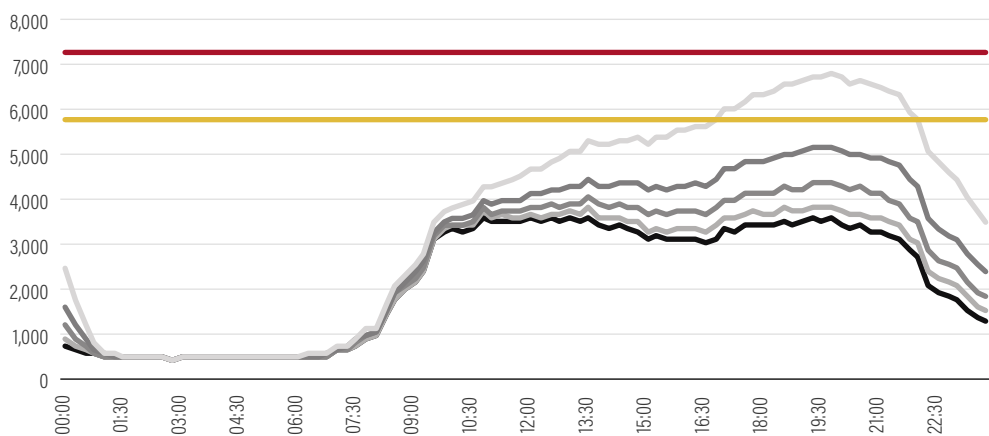
**Office**

(Charging power: 60kW, Coincidence factor: 15%)



**Commercial complex**

(Charging power: 60kW, Coincidence factor: 5%)



Source: calculated by this study

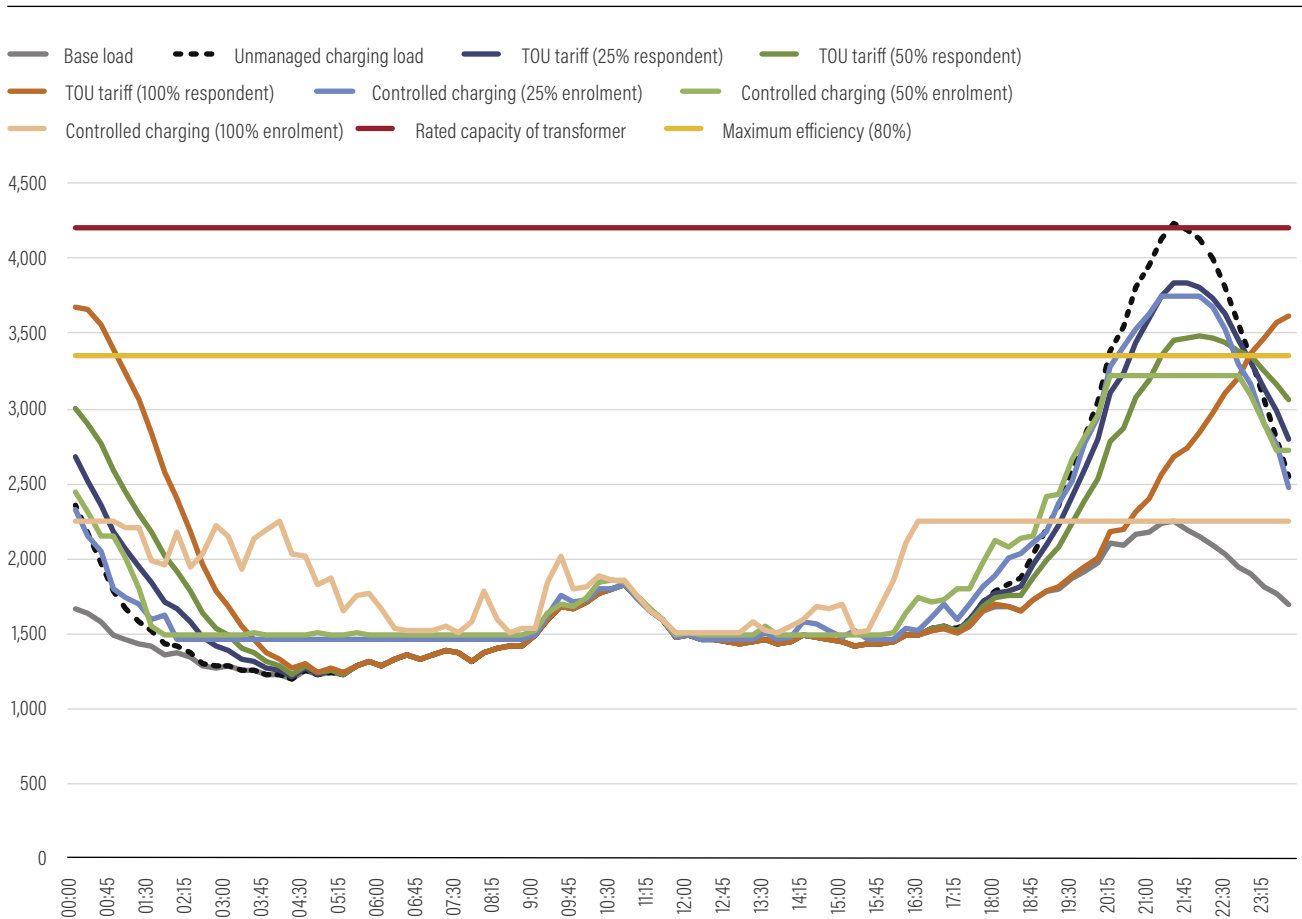


managed charging measures, controlled charging is more ideal to optimize PEVs' charging loads. While the time-of-use (TOU) utility tariff may be useful to reduce peak loads, its impact is limited because it may create another load spike at the beginning of the off-peak period.

The study concludes that with the increased use of PEVs, grid operators and governments should plan in advance and implement measures that mitigate the impact of PEVs on the grid. Although V2G is most effective, its technical, regulatory, and public acceptance barriers prohibit recent large rollout. In the near term, controlled charging is the most viable

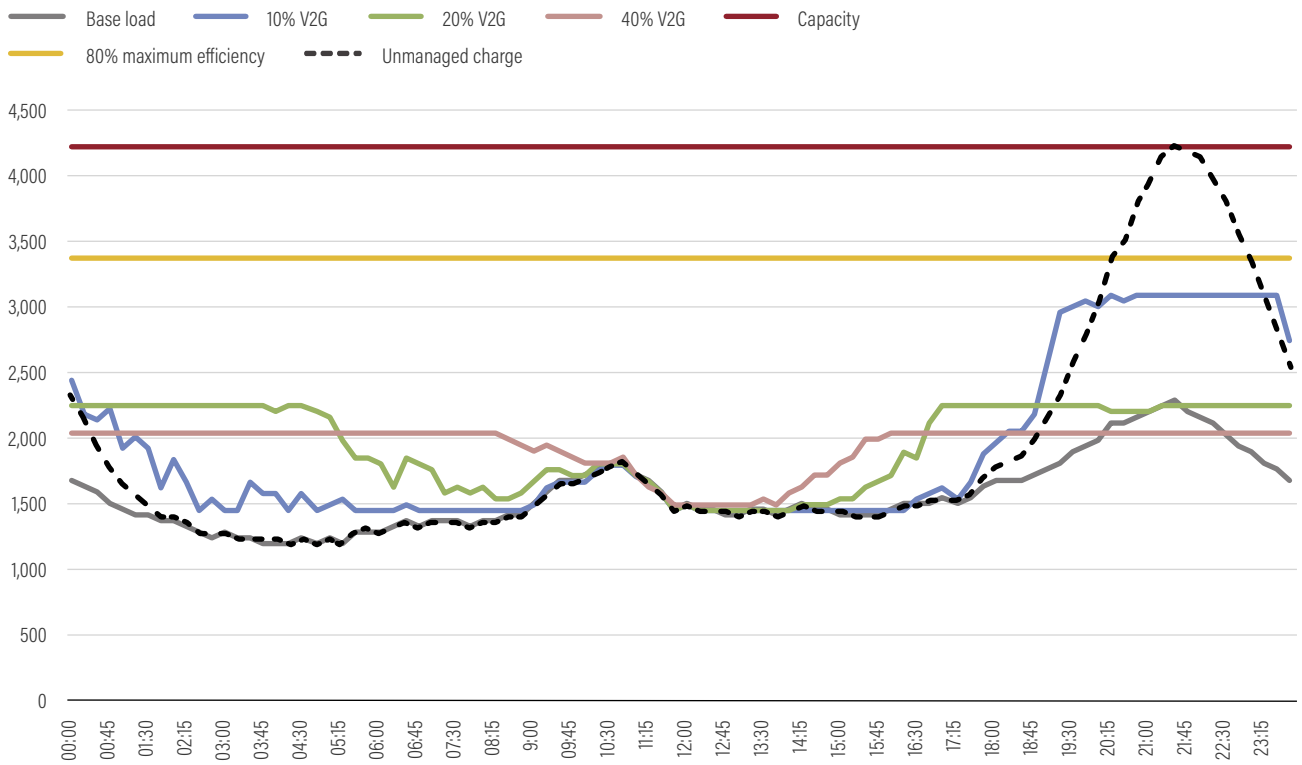
and necessary approach to curb PEVs' impacts on local transformers and defer relevant investments. The benefits of controlled charging on the distribution transformers mean that efforts should be taken to overcome obstacles such as business models and technical standards to ensure scalability. In the mid- to long-term, as technical and regulatory safeguards of V2G improve, small-scale V2G pilots would be possible for certain use cases (such as urban logistic freights providing peak shaving or frequency regulation) with demonstrated commercial values. The regulatory and technological safeguards to enable VGI measures will be discussed in the next report of the same series.

**Figure ES-3 | Optimized Transformer-level Load: Peak-shaving Effects of Managed Charging (100% vehicle electrification, unit: kW)**



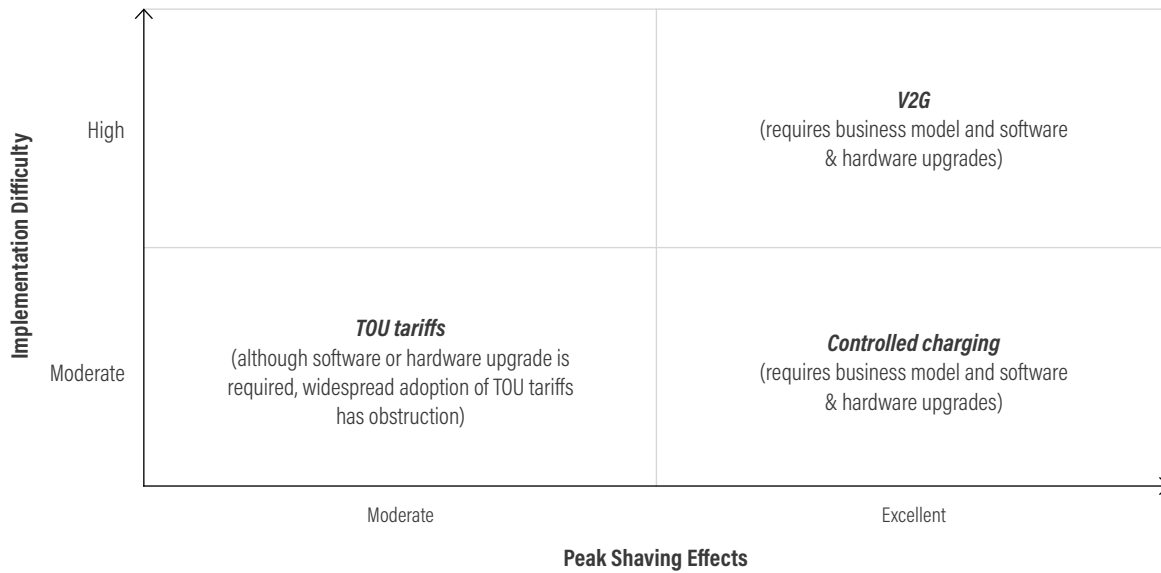
Source: calculated by this study

**Figure ES-4 | Optimized Transformer-level Load: Peak-shaving Effects of V2G (100% vehicle electrification, unit: kW)**



Source: calculated by this study

**Figure ES-5 | Peak-shaving effects and implementation difficulties of different VGI measures**





## 第一章

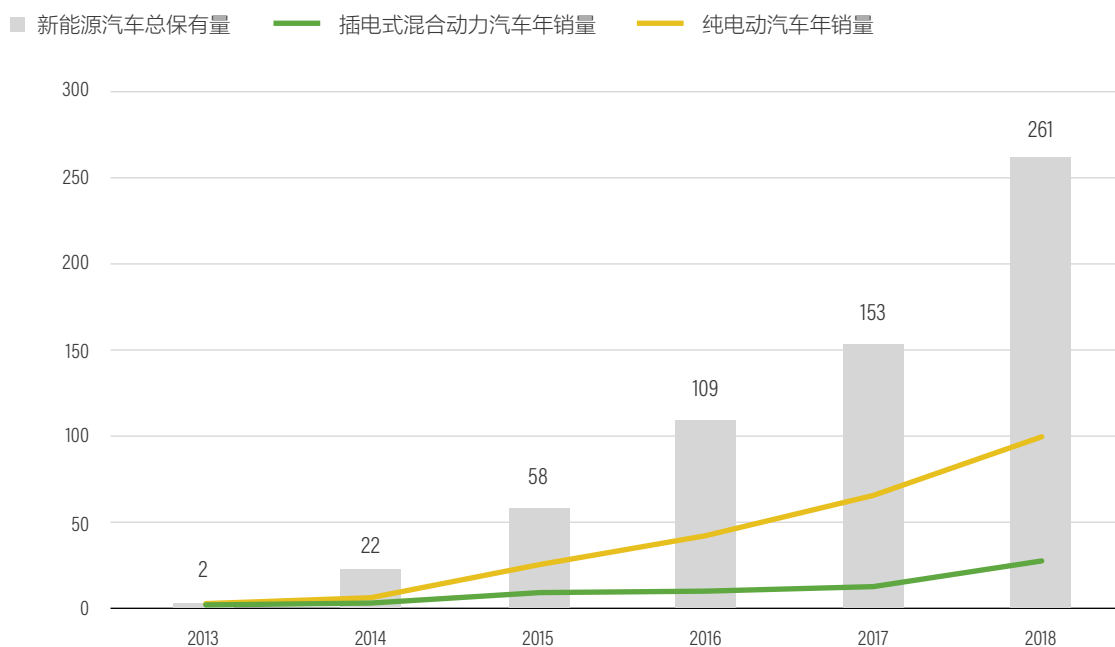
# 中国新能源汽车的未来推广趋势

新能源汽车的推广对中国交通行业温室气体减排和空气污染物防控具有积极意义。中国作为全球新能源汽车最大的市场，近年来新能源汽车增长势头强劲：2018年中国新能源汽车（含纯电动汽车、插电式混合动力汽车和氢燃料电池汽车）年销量为125.6万辆，比2017年增长115%，是第二名美国年销量的近3.5倍；截至2018年年底，中国市场的新能源汽车

总保有量约为261万辆（见图1），占全球新能源汽车总保有量的47%（中国汽车工业协会 2018）。

展望未来，中国新能源汽车的高速增长态势将持续。根据中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心预测（2019），在基准情景下，2050年中国乘用车市场中，纯电动乘用车的保有量将达到2.3亿辆（占比

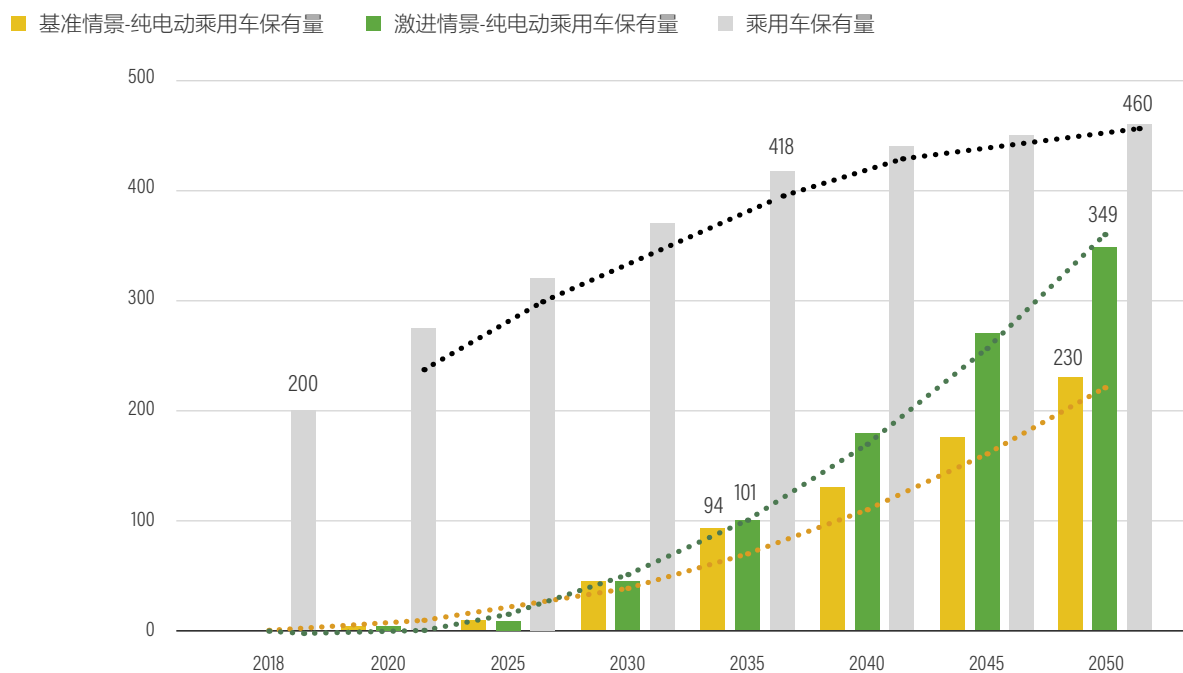
图 1 | 中国新能源汽车年销量和保有量（单位：万辆）



数据来源：中国汽车工业协会历年统计数据



图 2 | 本研究不同情景下纯电动乘用车保有量增长情况（单位：百万辆）



数据来源：中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心 2019

为50.1%)，并以纯电动汽车为主力。在激进情景下，即在基准情景基础上考虑政策加码（自2035年起实施分区域、分车型的“禁燃”政策），乘用车市场中纯电动汽车保有量将在2050年上升至3.5亿辆（占比为75.8%）（见图2）。

与其他国家不同，无论在私人乘用车领域还是公共领域，中国的新能源汽车均以纯电动汽车为主。例如，2018年中国纯电动汽车保有量占新能源汽车保有量的81%，高于全球71%的平均水平。由于中国新能源汽车推广以纯电动汽车为主，后文的分析将主要针对纯电动汽车，并简称其为“电动汽车”。

但是，随着电动汽车保有量的快速增长，其用电量与用电负荷也随之增长，对未来发电侧、输配电侧以及充电桩规划布局都有深远的影响。例如，根据麦肯锡（2018）定量分析，在德国，2050年电动汽车充电仅增加1%~5%的全网日高峰负荷，在发电和输电系统可承受范围内，但电动汽车对配电网的影响更严重，特别是当电动汽车渗透率超过25%时，本地高峰负荷将增加约30%；在印度，根据布鲁金斯学会预测（Ali 和Tongia 2018），2030年电动汽车充电负荷可能将占全网日高峰负荷的28%~50%，对发电、输电和配电系统均产生较大影响；在中国，电动汽车未来大规模推广对电网系统的影响也需要系统地进行预测。

为定量预测未来电动汽车推广对电网的影响，本文以目前中国电动汽车充电和出行的大数据为基础，建立模型，对未来不同情景下电动汽车对电网的影响进行评估。在此基础上，本文进一步定量分析不同电动汽车与电网协同措施（包括有序充电和电动汽车双向充放电）对缓解电动汽车对电网影响所发挥的作用。

**电动汽车无序充电：**指电动汽车用户随时、随地、随机进行充电，不对充电时间、充电功率等进行引导与控制。

**电动汽车单向有序充电** 简称“有序充电”，指在满足电动汽车充电需求的前提下，运用峰谷电价的经济措施或者智能控制措施，优化调整电动汽车充电时序与功率。

**电动汽车双向充放电（V2G）** 指在满足电动汽车充电需求的前提下，将电动汽车视作储能设施，当电网负荷或本地负荷过高时，由电动汽车向电网负荷或本地负荷馈电；当电网负荷或本地负荷过低时，可通过有序充电，调整本地负荷的峰谷差。

天津第一家



EV 电动汽





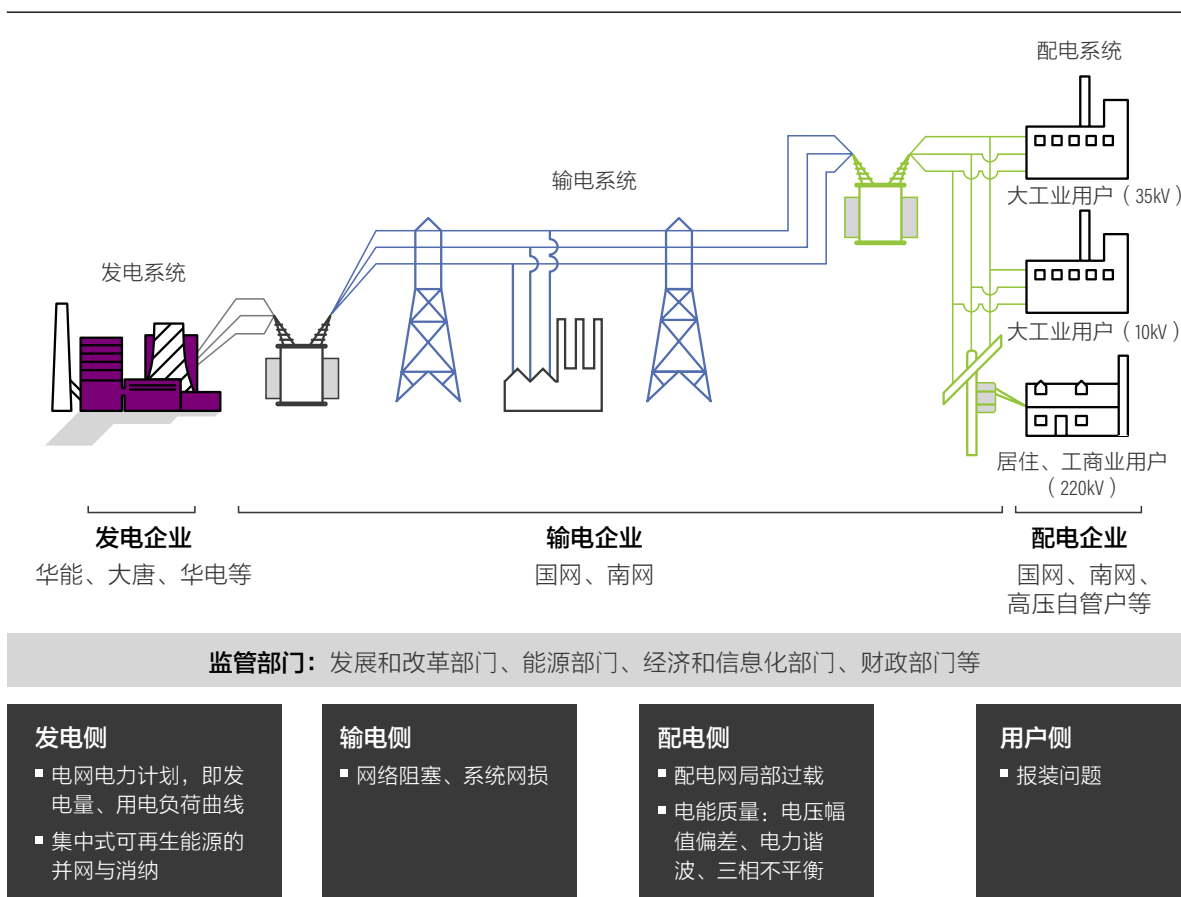


## 第二章

# 电动汽车规模化推广对电网的潜在影响

中国电动汽车规模化推广带来的用电量与用电负荷增长，对未来发电侧、输电侧、配电侧、供电侧，以及充电桩规划布局都有着深远影响（见图3）。

图 3 | 电动汽车规模化推广对发电、输电、配电和供电的影响





## 2.1 电动汽车无序充电对发电侧的影响

在中国，电动汽车无序充电对发电侧产生的潜在影响包括提升全社会用电量需求和加剧电网负荷的峰谷差（国网能源研究院 2018，国家发展和改革委员会能源研究所 2017）。

在用电量上，中国用电需求高速增长，电动汽车的增长将是主要助推力之一。以2050年新能源汽车（含乘用车和商用车）保有量为2.4亿辆进行预测，其年用电量将达4922亿千瓦时<sup>1</sup>，相当于2018年中国全社会用电量的7.2%。

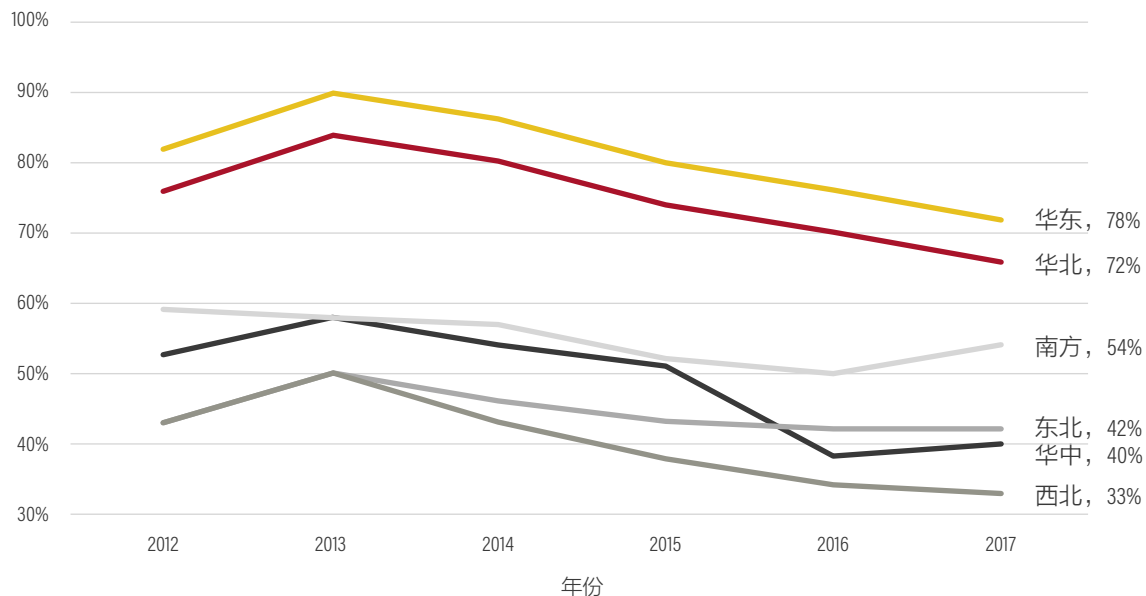
在用电负荷上，电动汽车的无序充电也会增加全网用电的峰值负荷，加剧负荷的峰谷差。受居民用电和第三产业用电影响，全国电网的峰谷差正不断扩大：2018年全国电网用电的年负荷峰值已较2017年增加7.8%，特别是在国家电网有限公司经营的华东和华北地区（如河北、山东、江苏等省份）尤为明显（见图4）。这些电力供需平均偏紧张的省份也是新能源汽车增长速度较快、规模较大的区域。虽然目前电动汽车充电对电网的影响不显著，但是如果未来电动汽车在用电高峰时进行无序充电，可能将进一步加剧电力供需的失衡。根据国网研究院（2018）预测，电动汽车无序充电将导致2020年与2030年全国的峰值负荷分别增加1361万千瓦和1.53亿千瓦，分别相当于区域峰值负荷（无电动汽车充电情景）的1.6%和13.1%。

## 2.2 电动汽车无序充电对输配电侧的影响

作为电网的末端，配电网会首当其冲受到大规模电动汽车同时充电的影响。在极端情况下，电动汽车的无序充电也会影响输电网（即主干网），可能造成输电阻塞与区域电力送电能力不足，增加重载输电线路的输送功率。

中国目前的配电网容量与管理模式无法适应电动汽车、分布式可再生能源和居民用电需求的快速增长。配电网的规划对电动汽车的普及仍是“被动适应”过程，特别是建筑年代较早的居民区、老城区等，配变的开放容量一般较小。例如，广东省中山市对30个居民小区和商业区进行的配电网普查表明，截至2020年，石岐区老旧小区和商业区的全部配电系统需要升级改造，南区商业中心和办公单位的变压器需要扩容，30条普查的线路中有13条需要升级改造（中国电力企业联合会2019）。2016年北京市小区及写字楼电动汽车充电需求调查显示，14%的居民小区和6%的写字楼的配电容量不满足当时的电动汽车充电需求（中国汽车技术研究中心北京工作部 2016）。据北京市交通委员会预测，在2035年北京市300万辆新能源汽车的规模下，城市不仅要增容局部配电网，也要新建主干网。城市输配电网的增容难度不仅在于投资成本高，进而增加全社会电价，也受用地空间约束。

图 4 | 中国2012-2017年区域电网最高负荷占总装机量比例



数据来源：中国电力企业联合会、华创证券 2018

电动汽车不仅会增加配电网负荷容量，造成局部过载问题，也会影响配电网的电能质量。电动汽车属于大功率、非线性负荷的用电设备，大量电动汽车同时充电会导致短时电压降超标；电动汽车充电装置在实现电网交流电和电池直流电转换时，也会产生电力谐波；交流桩一般使用电网单相电，各相位负载不平衡可能会引起电网的三相不平衡问题；此外，车辆放电过程会存在孤岛效应。这些影响对配电网容量、自动化水平、可靠性和安全性均提出了更高的要求（王军亮等 2018）。

在电网企业盈利能力下滑、输配电价上升的背景下（国家电网有限公司 2019），针对新能源汽车推广带来的配电网扩容、自动化改造投资需求，需探索高效、可持续的配电网改造模式。2018年，全国电网投资约是电源投资的2倍，其中，110kV以下配电网投资占电网投资的比例达57.4%（中国电力企业联合会2019）。虽然配电网投资当前主要集中于农网的改造与升级，但随着新能源汽车、分布式可再生能源和电供暖设施的普及，未来城市配网智能化与容量升级的需求将不断增长，并替代农网投资，成为配电网主要的投资方向。在电网企业面临盈利挑战与控制用电成本的当下，如何合理满足配电网日益增长的投资需求，成为亟待解决的问题。

## 2.3 电动汽车对充电基础设施建设与售电服务的影响

电动汽车的普及和推广对充电基础设施建设和售电服务也提出了新的要求：理想情况下，应实现电网对私人 and 公共充电桩的“直供电”以及电价信号的“有效传导”。然而，由于利益机制等问题，不是所有充电桩都单独报装，部分充电桩（包括私人桩和公共桩）直接从物业场地

接线，存在物业业主的“转供电”问题。如何实现电网对充电桩的直接供电、解决零散报装问题，是整合充电服务企业、电网企业、售电企业、物业服务企业、用户等各利益相关方，在建桩和售电环节亟须解决的问题。

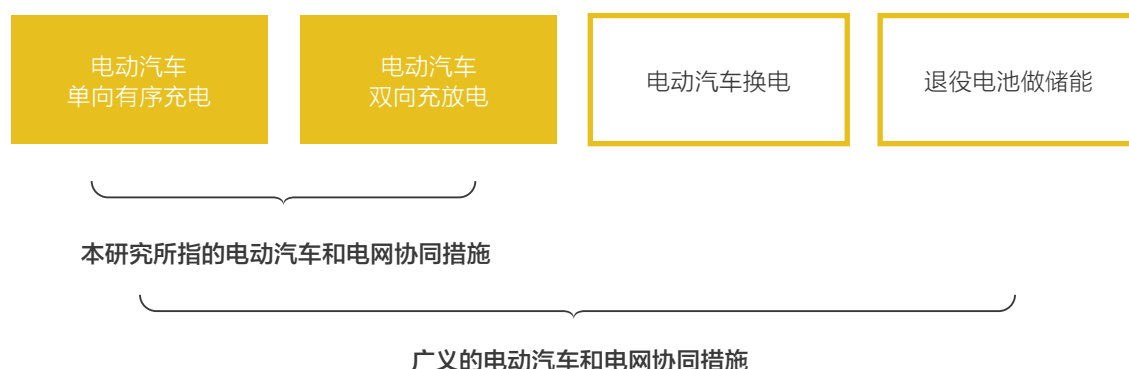
## 2.4 电动汽车与电网协同的作用

与其他用电负荷不同，电动汽车负荷高度灵活，具有可调度性（见专栏一）。除了作为灵活负荷，电动汽车甚至可以作为储能设施进行“放电”。如果实现电动汽车与电网的协同，可以在一定程度上降低车辆充电对电网的影响。根据Agora Verkehrswende（2019）的研究，未来德国电动汽车如果采用有序充电，不仅可以降低自身对电网的影响，更可以降低由电动汽车、电热泵和分布式可再生能源带来的配电网扩容成本。而在中国，电动汽车与电网协同能否发挥类似的作用，也需要进行系统评估。

考虑到电动汽车发挥作用、技术要求的差异，电动汽车和电网协同措施（以下简称“车网协同”）通常划分为<sup>2</sup>单向有序充电和双向充放电（见图5）。

- **单向有序充电（Smart Charging, V1G）**：在满足电动汽车充电需求的前提下，运用峰谷电价的经济措施或者智能控制措施，优化调整电动汽车的充电时间与充电功率。
- **双向充放电（Vehicle-to-grid, V2G）**：在满足电动汽车充电需求的前提下，将电动汽车视作储能设施，当电网负荷或本地负荷过高时，由电动汽车向电网或本地负荷馈电；当电网负荷或本地负荷过低时，可通过有序充电，调整本地负荷的峰谷差。

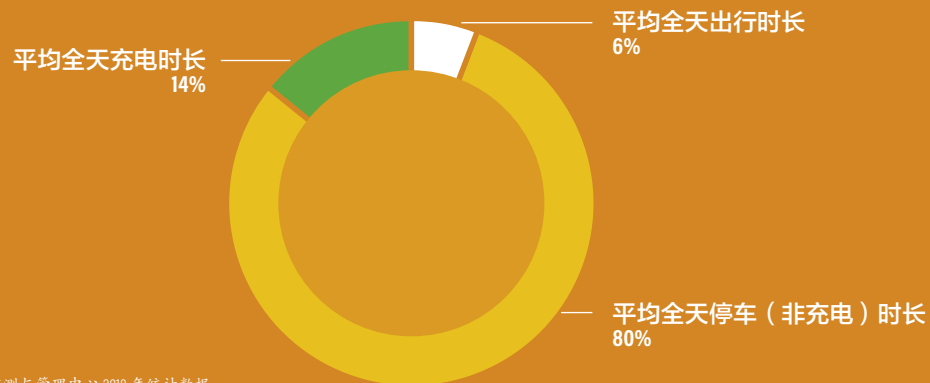
图 5 | 电动汽车与电网协同方式类型与本文范畴



## 专栏 1 | 电动汽车的可调度性

**可调度的时间：**电动汽车的停车时间可视为“可调度时间”。根据本研究对北京私家电动汽车出行及充电行为的统计，电动汽车日出行时间平均为1.5小时，94%时间处于停车状态。全天22.5小时的停车时间中，约3.4小时为接入电网的充电时间，剩余19个小时为“闲置”的停车时间（见专栏图1）。

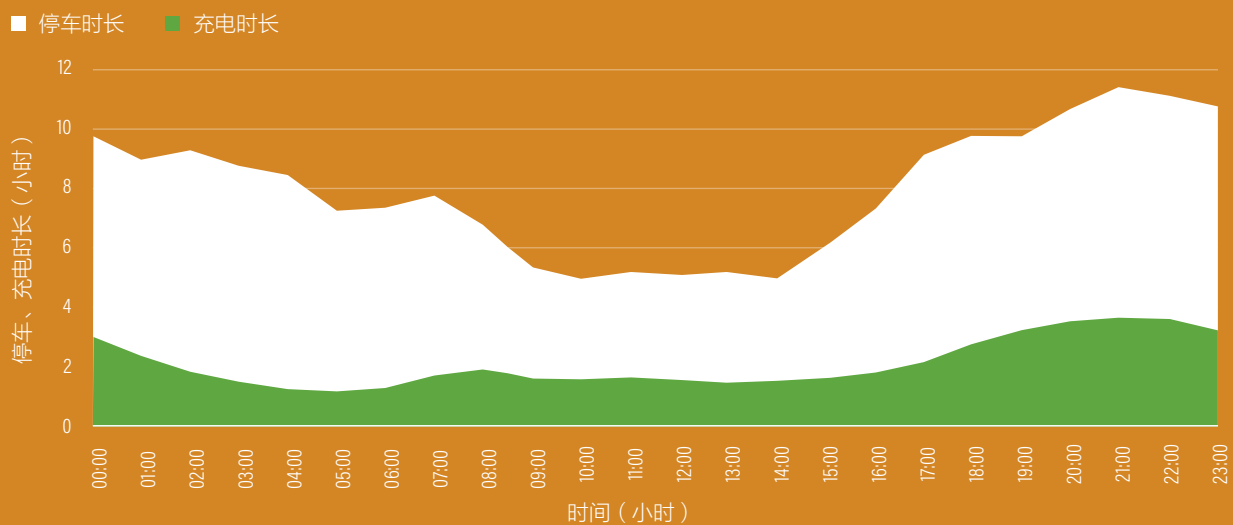
专栏图 1 | 北京私家电动汽车一天中平均停车、行驶和充电时间分布（24小时时间占比）



数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据

从一天不同时段看，私家电动汽车的充电时长远小于其停车时长。例如，北京私家电动汽车在夜间18点以后充电时长通常需要3小时，远小于夜间平均11小时的停车时间。在日间（上午9点至下午16点），私家电动汽车充电时长大约为1.5小时，小于日间平均停车时长5小时（见专栏图2）。

专栏图 2 | 北京私家电动汽车一天不同时段里平均停车时长、充电时长对比



说明：某个时刻的停车时长表示私家电动汽车在该时刻开始停车所需的停车时长；某个时刻的充电时长表示私家电动汽车在该时刻开始充电所需的充电时长。

数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据

## 专栏 1 | 电动汽车的可调度性（续）

**可调度的充放电容量：**在不影响电池衰减的条件下，私家电动汽车可提供的储能潜力不可忽视。如果私家电动汽车只进行充电的话，由于私家电动汽车通勤日耗电量与日行驶里对应的用电量基本一致，且日行驶里程多在50千米以内，因此私家电动汽车日充电量一般为6~9kWh左右。相对而言，如果私家电动汽车发挥储能作用，既可充电也可放电（放电深度设定为不低于30%SOC），则私家电动汽车可提供的日充放电量为23~36kWh（见专栏表1）。

专栏表 1 | 私家电动汽车作为储能与作为出行工具所能调节的电量比较

电池容量	私家车仅作为出行工具的日充电量 (kWh)	电池容量占比	私家车作为储能的日充放电量 (kWh)	电池容量占比
45kWh	9	20%	22.5	50%
60kWh	6	10%	36	60%

说明：假设私家电动汽车放电深度设定为不低于30%SOC。



## 2.5 研究范围

电动汽车大规模接入电网后对电网的用电需求（用电量、电力负荷）、电能质量和安全性等均产生影响，但对用电需求的影响更广泛也更迫切。可以通过及早规划新电源、大规模进行电网基础设施升级改造投资，以及探索车网协同的技术创新与商业模式等方式，降低电动汽车对电网负荷的影响。若不及时采取相关措施，电网系统短期的容量限制也会反过来影响充电基础设施建设，甚至影响电动汽车推广。较之电动汽车对电网负荷的影响，电动汽车导致的电压幅值偏差、电力谐波、三相不平衡等问题，较容易化解，会随着配变增容、车网协同措施的采纳而一并解决，因此不在本文研究范畴内（见图6）。

在车网协同的分析上，电动汽车近期迫切需要解决的问题是：利用电动汽车负荷的灵活特征，可以在多大程度上缓解对电网的影响。由于本文侧重车网协同措施对电网影响的量化分析，对如何通过政策或市场化手段使车网协同措施成为现实仅作简单讨论。针对在中国推广车网协同措施所需的制度、技术、资金投入与公众接受度保障，感兴趣的读者可阅读本系列论文的第二篇——《中国电动汽车和电网协同路线图研究》。

图 6 | 电动汽车对电网影响与本文研究范畴



说明：黄色高亮部分为本文主要研究范畴。



国家电网 STATE GRID



GZCY-001

电动汽车充电桩



直流充电  
DC Charging

直流充电  
DC Charging





用专交公

7-9

### 第三章

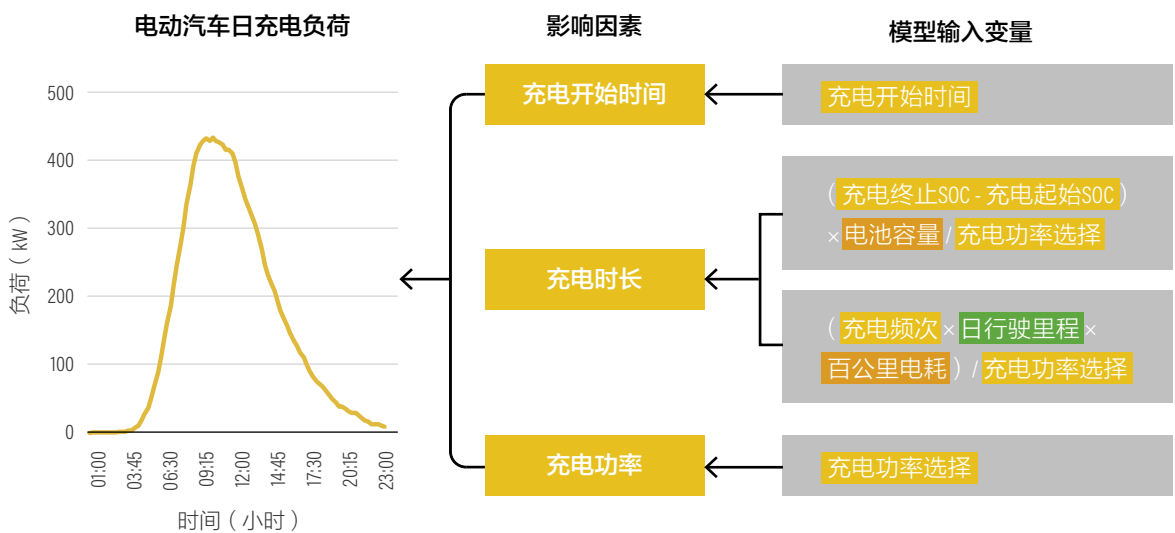
# 中国典型城市出行与充电行为分析

电动汽车充电对电网的影响不仅与车辆规模有关，也与居民出行行为和充电行为等因素直接相关（见图7）。

由于电动汽车特别是私家电动汽车未来将在数量上占绝对优势，且在出行与充电行为上存在

较强的随机特征，因此，对私家电动汽车出行和充电行为特征的深入了解是分析电动汽车对电网影响的前提。虽然本研究利用国家新能源汽车监测与管理平台对新能源汽车的监测数据，对私家电动汽车、电动出租车、电动公交车等车型的出行与充电行为均进行了量化分析，但由于私家电

图 7 | 电动汽车单车无序充电对电网的影响因素



说明：模型输入变量中，黄色文字表示充电行为，绿色文字表示出行行为，红色文字表示新能源汽车车辆性能。

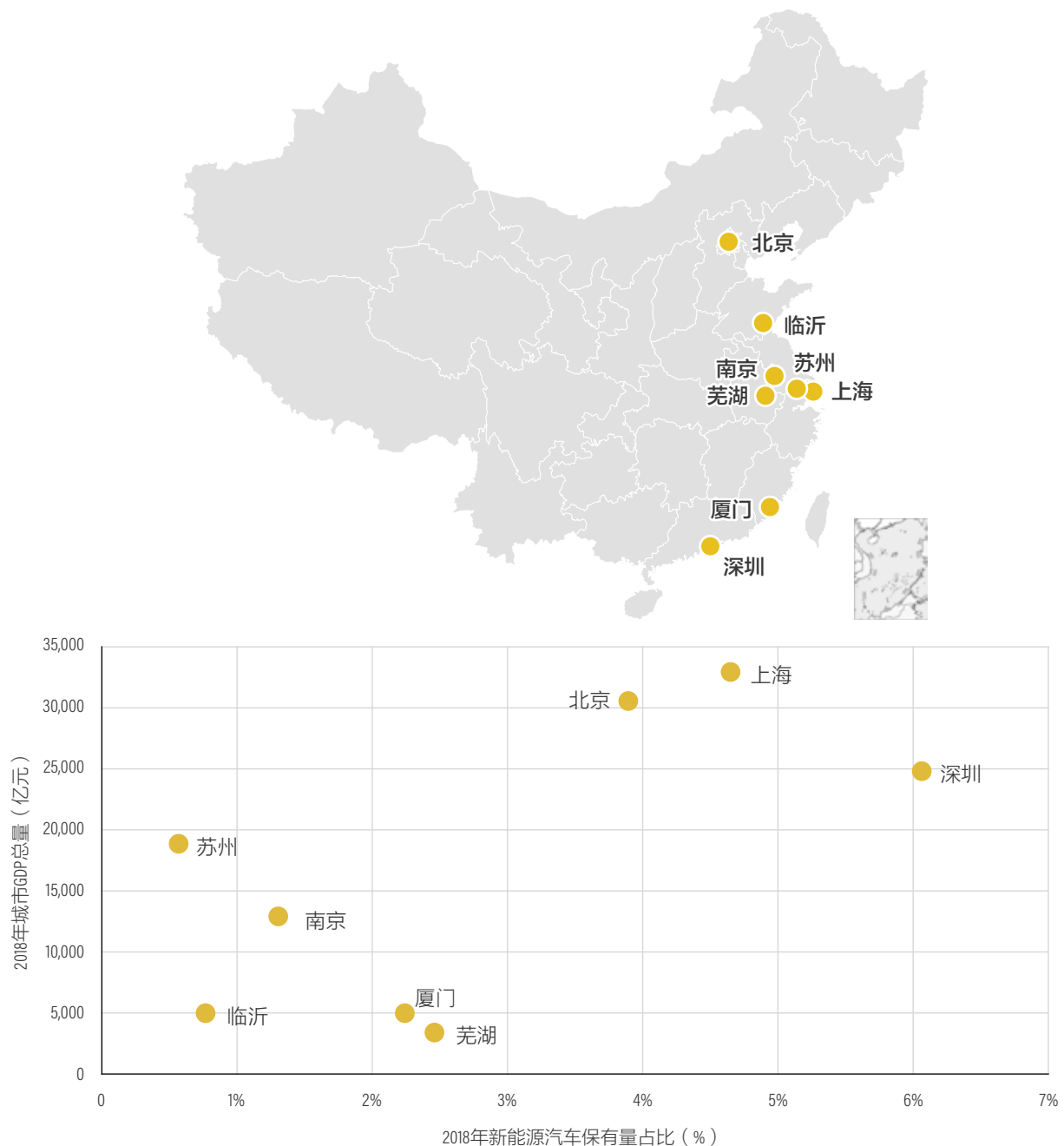


动汽车的重要性与篇幅限制，本节仅介绍对私家电动汽车的分析结果。

在研究范围上，本文选择新能源汽车规模、城市经济发展水平各不相同的八个城市（北京、上海、深圳、南京、苏州、厦门、芜湖和临沂）进行分析（见图8）。这些城市涵盖了共计23.4万辆私家电动汽车。

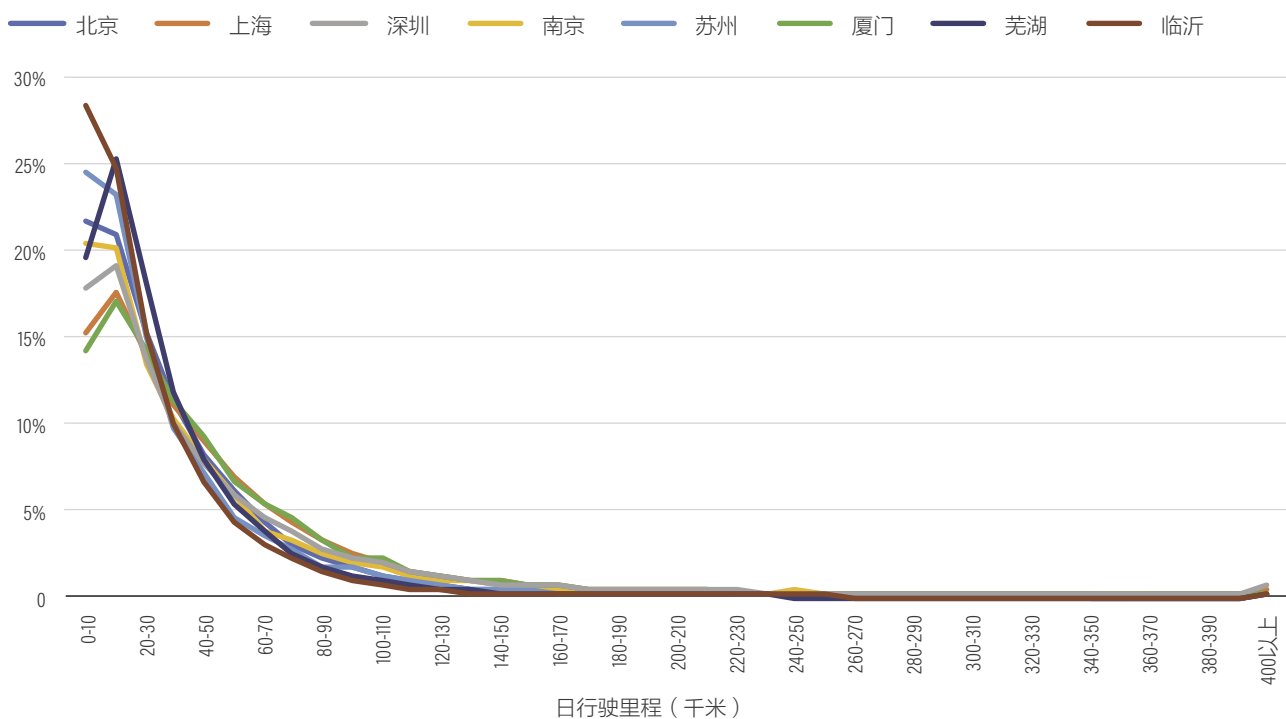
在时间选择上，本研究数据切片时间为2018年6月至8月，即为夏季居民出行和充电行为分析，与后文中夏季电网负荷数据相对应。选择夏季主要原因是电网负荷尖峰集中在夏季，此时电动汽车对电网的影响将更突出。此外，考虑到居民出行行为在工作日和非工作日的差异（见专栏二），本文仅对工作日的情况进行分析。

图 8 | 本研究抽取的私家电动汽车出行和充电行为的城市及基本情况



数据来源：中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心

图 9 | 各城市私家电动汽车日行驶里程分布（单位：归一化的出行次数占比）



数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心对 8 个城市的统计数据（2018）

### 3.1 日行驶里程

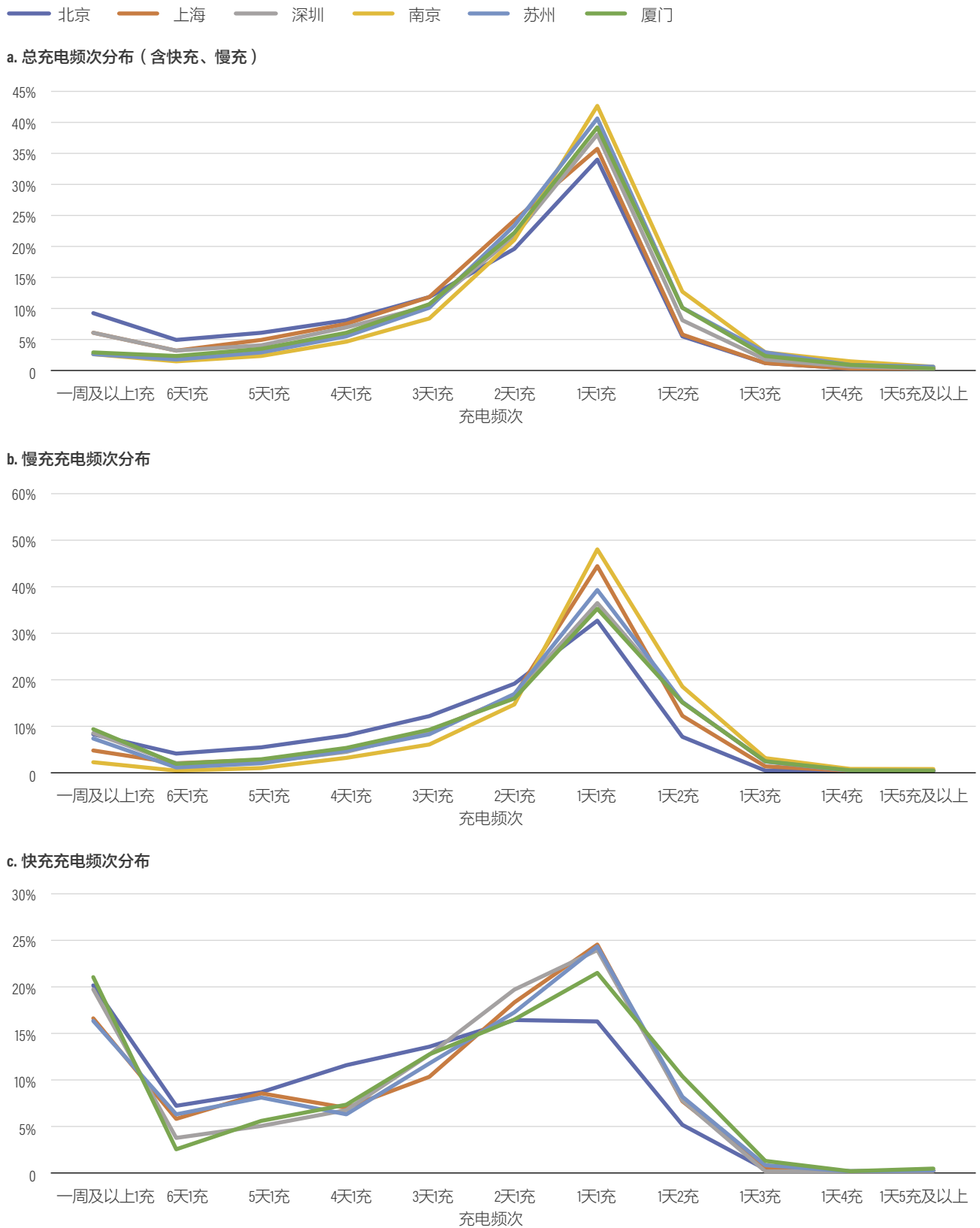
无论城市大小，私家电动汽车日行驶里程分布基本一致，以通勤为主的私家电动汽车日行驶里程集中于10~20千米，14%~28%的私家电动汽车日行驶里程在10千米以内，50%的私家电动汽车日行驶里程小于30千米，80%的私家电动汽车日行驶里程小于50千米（见图9）。

### 3.2 充电频次

虽然以日行驶里程推算，电动汽车搭载的40~60kWh 电池电量基本可满足一周充电1~2次的要求，但无论城市大小，私家电动汽车充电频次以“一天一充”为主（见图10a），且每次基本充满（见图14）。具体看，私家电动汽车慢充（充电功率低于10kW）的频率最高，以“一天一充”为主（见图10b）。快充频次略低慢充，除“一天一充”外，也呈现出“多天一充”的趋势，特别是北京的快充频次分布更广，“一天一充”、“两天一充”、“三天一充”和“四天一充”几乎平均分布（见图10c）。



图 10 | 典型中国城市私家电动汽车充电频次分布（单位：归一化的充电频次占比）



说明：充电功率浮动变化较大，本文定义充电功率10kW以下为慢充，充电功率10kW以上为快充。其中，车辆数样本数量少的城市未计入。  
数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心对8个城市的统计数据（2018）

### 3.3 起始充电时间与充电荷电状态 (SOC)

所有城市宏观层面的私家电动汽车充电起始时间大致规律是一致的，这也与居民在一天中的出行行为规律紧密相关（见图11）。例如，所有城市的私家电动汽车充电开始时间在凌晨到早晨6点时间段内为低谷。

但是，受到不同城市工作时间、峰谷电价差、充电桩配套完善程度等因素影响，私家电动汽车充电起始时间曲线在细节上略有差异（见图11），例如：

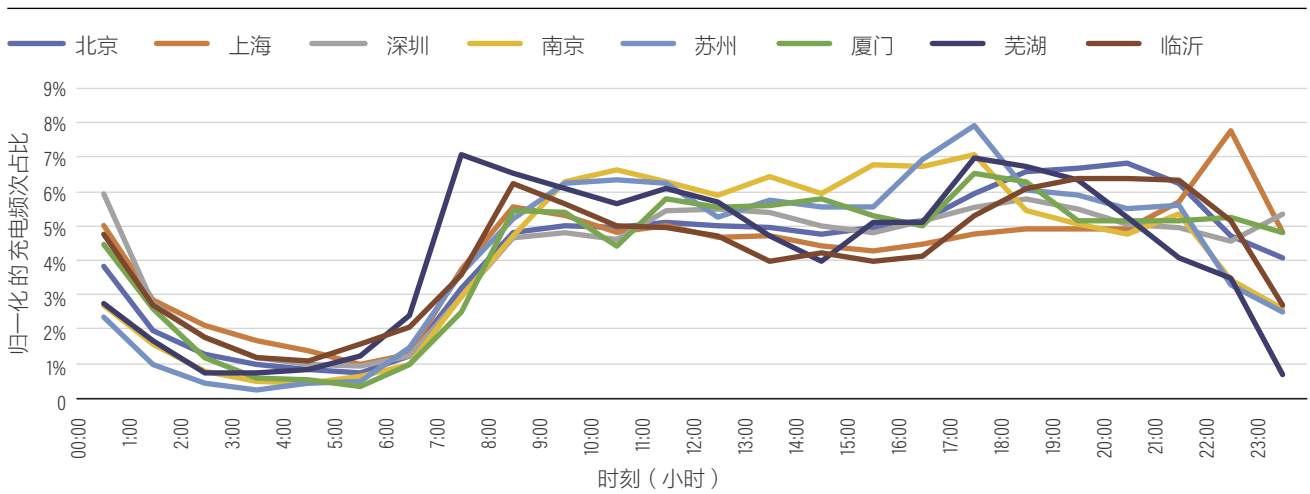
- 芜湖的充电开始时间集中于早晨7点到9点，即到

达办公地点后充电。

- 苏州、南京、厦门和临沂的充电开始时间集中于下午17点到晚上20点。
- 北京、上海等大城市晚间充电时间较晚，一般在晚上20点到24点，深圳更是在夜间23点到24点才达到充电峰值。

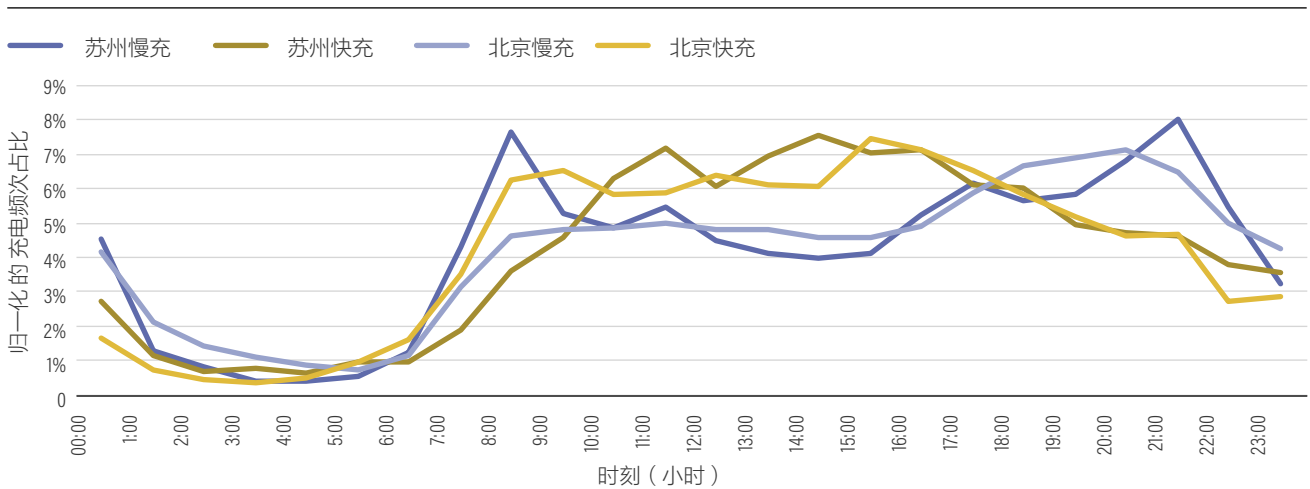
私家电动汽车快、慢充的充电开始时间差异较明显（见图12）：快充的充电开始时间分布与燃油汽车加油时间分布较类似，均发生于日间；慢充的充电开始时间分布较简单，集中于晚间，即回家后开始慢充。这说明，未来快充、慢充充电比例的变化会导致全社会的充电起始时间曲线发生变化——特别是决定未来的宏观层面充电负荷峰值是集中于夜

图 11 | 私家电动汽车充电开始时间日平均分布



数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心对8个城市的统计数据（2018）

图 12 | 苏州、北京私家电动汽车慢充和快充的充电开始时间分布

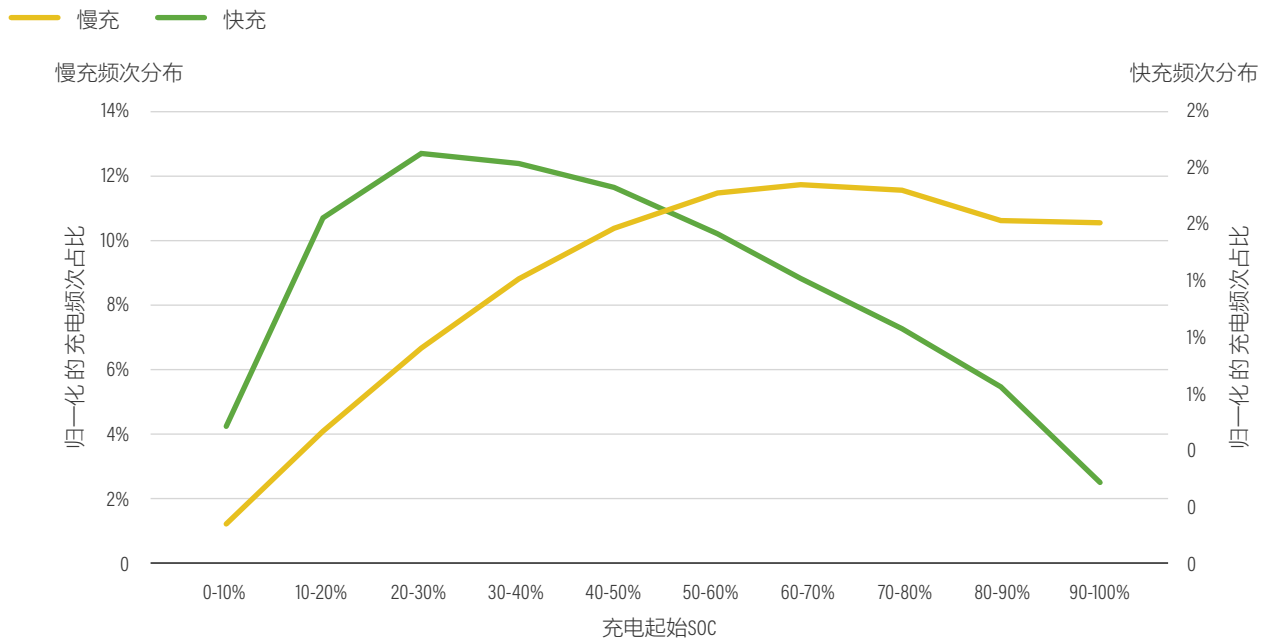


说明：充电功率浮动变化较大，定义充电功率10kW以下为慢充，充电功率10kW以上为快充。此外，该归一化结果是快充、慢充加总后的归一化结果。

数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心的统计数据（2018）



图 13 | 苏州、北京私家电动汽车慢充和快充的充电开始SOC分布



说明：该归一化结果是快充、慢充加总后归一化结果，其中快充占比较小。该研究选择北京是因为北京快充的私家电动汽车数量较多，规律更为明显。  
数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心的统计数据（2018）

间还是白天。其次，不同城市的快充、慢充规律相似：以北京和苏州为例，两个城市的快充、慢充的充电开始时间分布曲线大致重合。

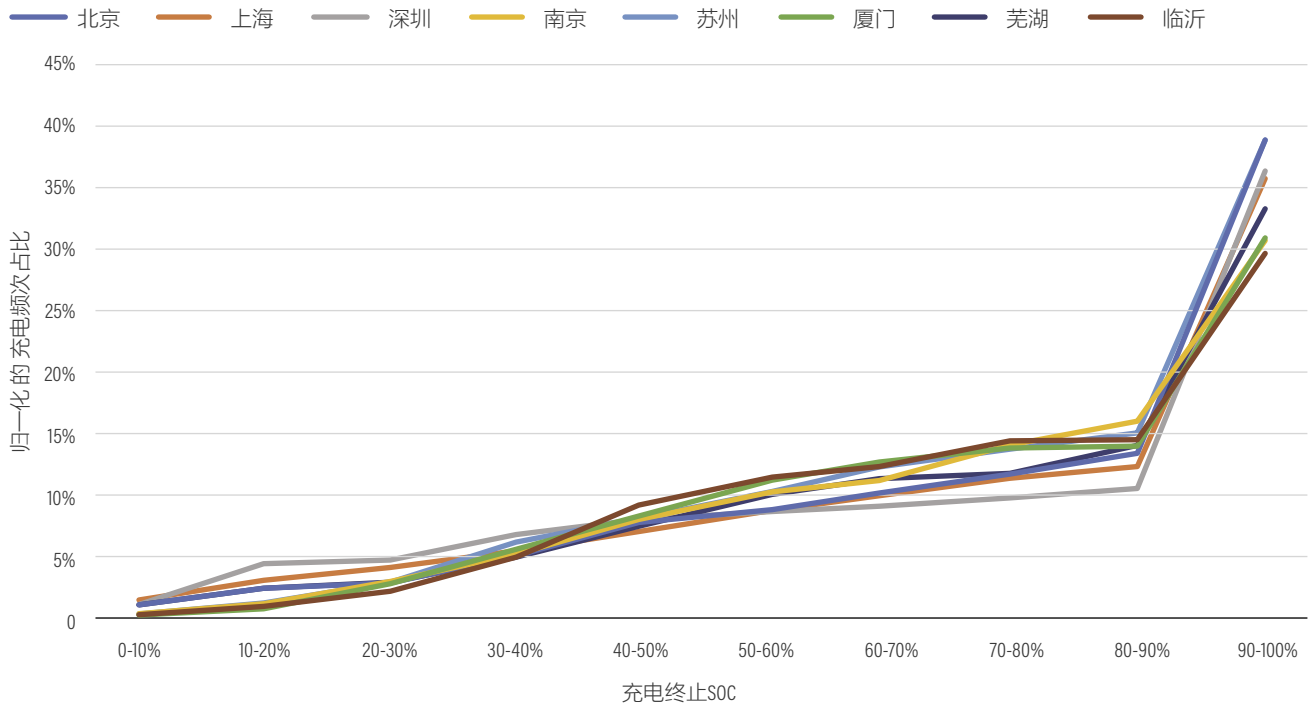
从充电起始SOC看，私家电动汽车慢充时起始剩余电量较多，而快充时起始剩余电量较少。这说明慢充符合“一天一充”的特征，日充电量基本与日行驶里程相关（见图13）。

### 3.4 终止充电荷电状态（SOC）

从不同国内城市私家电动汽车充电终止SOC分布（见图14）可见，车辆通常选择一次性充满，即终止SOC达到100%。此外，以北京为例，快充和慢充的私家电动汽车充电终止SOC的变化趋势没有差异，基本分布于90%~100%区间内（见图15）。这说明，私家电动汽车无论选择快充还是慢充，在充电时更习惯于充满。

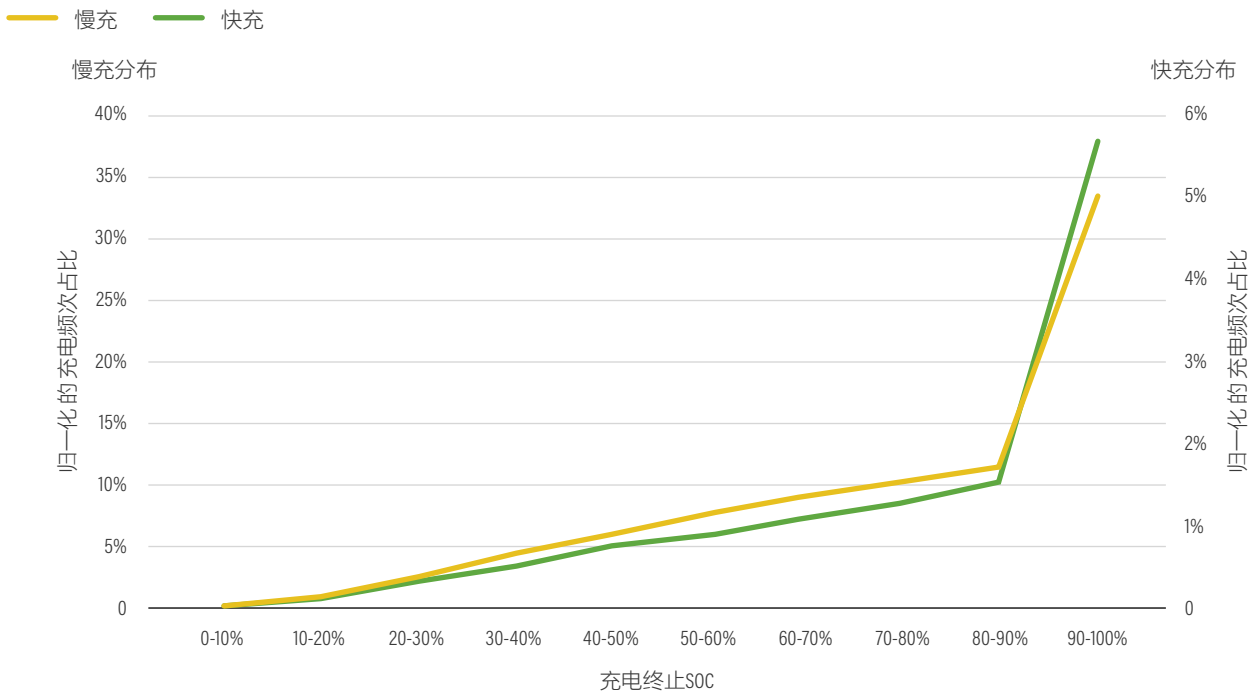


图 14 | 私家电动汽车充电终止SOC分布



数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心对8个城市的统计数据（2018）

图 15 | 北京私家电动汽车快充、慢充充电终止SOC分布



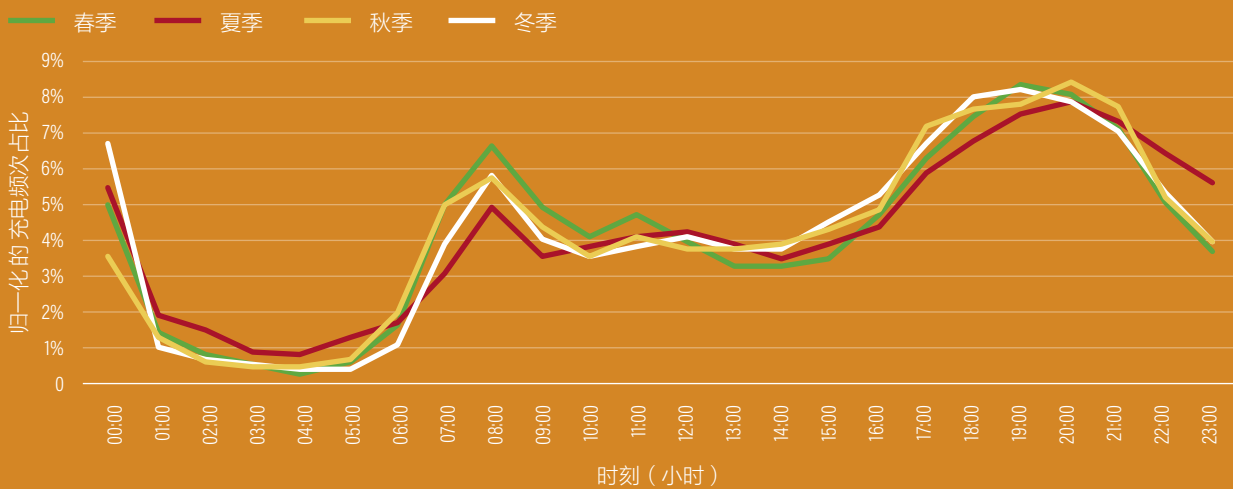
说明：该归一化结果是快充、慢充加总后归一化结果，其中快充占比较小（12%）。

数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心统计数据（2018）

## 专栏 2 | 私家电动汽车充电开始时间在不同季节、不同日期（工作与非工作日）的差异

以北京为例，不同季节下私家电动汽车充电时间分布相似：充电开始时间主要集中在上班前的上午7点至8点时段和下班后的下午18点至晚上21点时段。而夜间充电开始时刻峰值时间方面，冬季充电峰值时间最早，出现在下午18点；夏季最晚，峰值出现在晚上21点。夏冬两个季节的充电峰值时间相差3个小时（见专栏图3）。

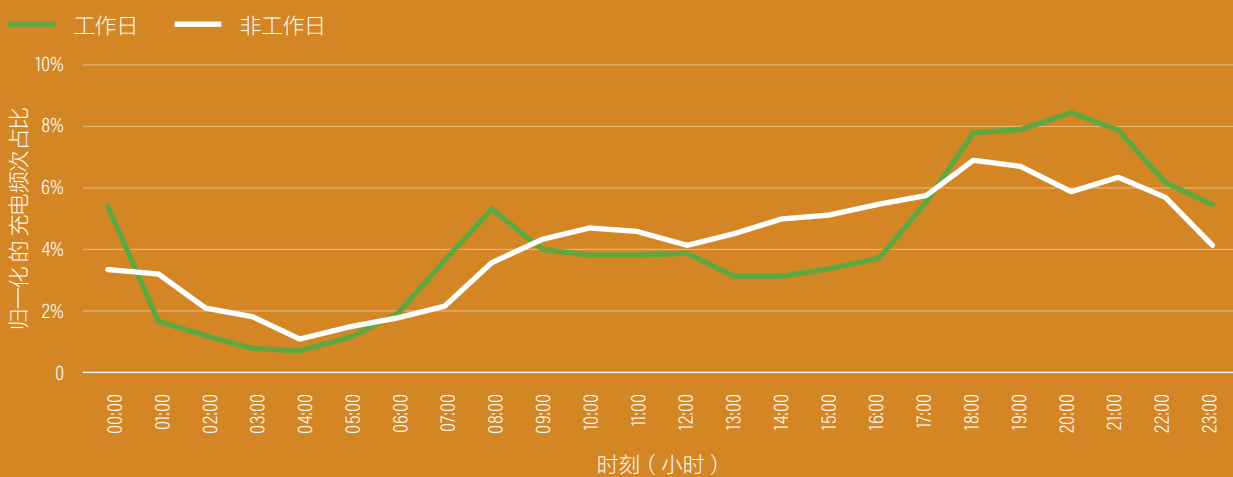
专栏图 3 | 北京私家电动汽车不同季节充电开始时间分布



数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据

对比北京市私家电动汽车夏季工作日和非工作日充电开始时间的分布图（见专栏图4）可见，工作日的充电时间分布符合工作日时间安排，即在上班前或下班后对车辆进行充电，而非工作日的充电时间较为分散，峰谷差较小。本文分析电动汽车对电网的影响时，主要采用工作日的充电开始时间规律。

专栏图 4 | 北京私家电动汽车工作日和非工作日充电开始时间分布



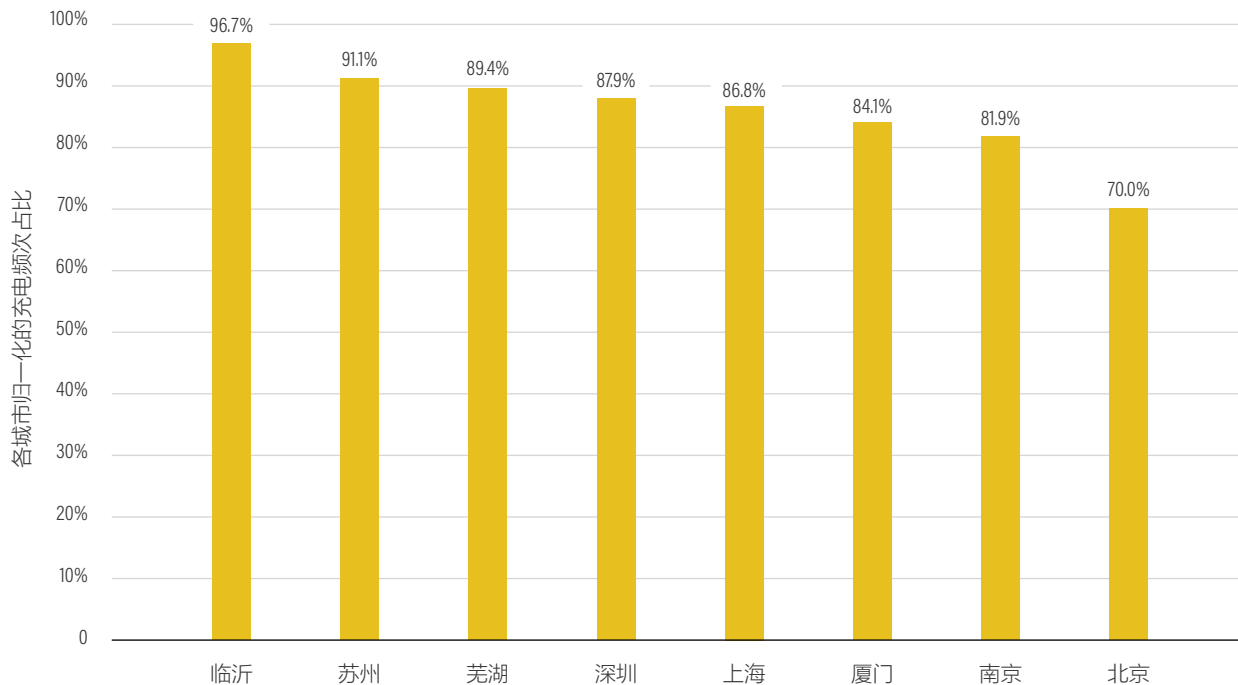
数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据

### 3.5 充电功率

以私家电动汽车为例，以10kW为快、慢充分界点，目前各个城市私家电动汽车充电仍以慢充为主，且以3.5kW慢充最为主流。在8个城市中，临沂、苏州、芜湖等城市慢充占比较高，仅有北京市快充比例最高，比例达30%（见图16，其他车型充电功率见专栏三）。

尽管目前私家电动汽车充电功率较低，但充电功率的提升将是未来必然趋势。国内外汽车生产厂商与充电桩生产企业正研发大功率充电桩。未来国家标准也将覆盖大功率直流快充领域，即最大充电功率将上升至350kW。在大功率充电方式下，未来电动汽车的充电时间将大大缩短，即充电10分钟可续航300千米。充电功率的提升虽然可缓解停车位不足的大城市的充电问题，以及营运车辆的快充需求，但也会加剧对电网的影响。

图 16 | 典型中国城市私家电动汽车慢充充电次数占比



数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据



### 专栏 3 | 各类电动汽车的充电功率分布

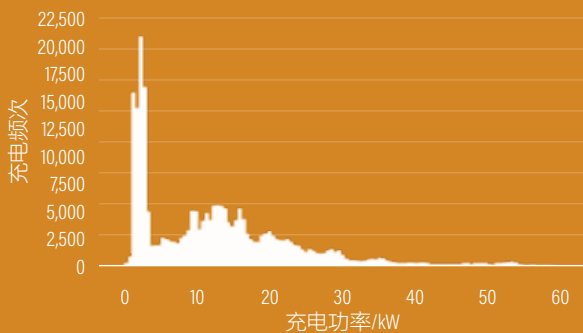
目前各类电动汽车中，电动公交车充电功率最大，一般大于20kW，最高功率可达200kW以上（见专栏表2）。私家电动汽车和电动物流车充电功率略低，通常以3.5kW为主（见专栏图5）。

专栏表 2 | 目前不同车型电动车的充电功率分布

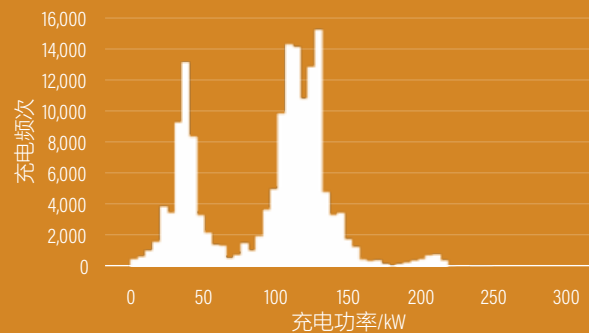
车型	充电功率范围
私家电动汽车、电动出租车	3.5kW、7kW、12kW、20-80kW
电动物流车	3.5kW、7kW、12kW、20kW
电动公交车	20kW、40kW、60kW、100kW、120kW、160kW、200kW

专栏图 5 | 不同车型电动汽车充电功率分布

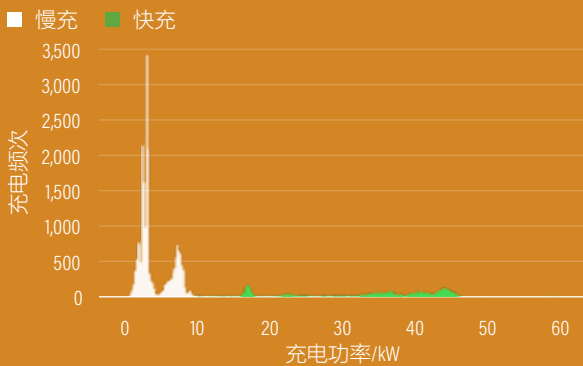
深圳电动物流车充电功率分布



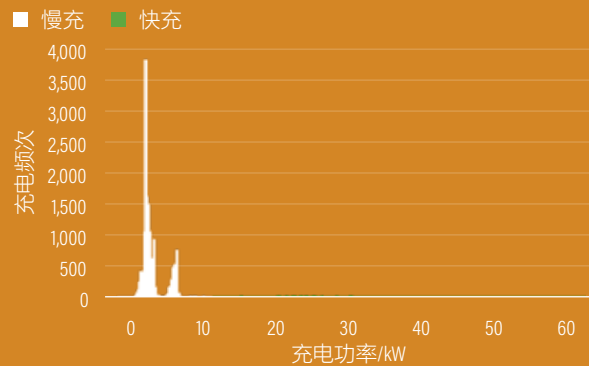
北京电动公交车充电功率分布



北京私家电动汽车充电功率分布



苏州私家电动汽车充电功率分布



说明：北京和苏州私家电动汽车的充电功率分布图中，以10kW为分界点，白色部分为慢充频次，绿色部分为快充频次。

数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心统计数据（2018）



\* 127

林巴士集团



沪D 98457 S2S-0279





## 第四章

# 模型方法

为定量预测未来电动汽车推广对中国电力系统——包括发电侧、配电侧的影响，本文以目前中国电动汽车充电和出行的大数据为基础，建立蒙特卡洛随机模型，对未来不同情景下电动汽车对电网的影响进行评估。在此基础上，本文进一步定量评估在微观场景下，电动汽车与电网协同策略——包括有序充电和电动汽车双向充放电（V2G），对缓解电动汽车对电网影响所发挥的作用。

### 4.1 宏观模型与微观模型

在模型的空间维度上，中国的电力调度级别以区域、省份、城市为单位，由区域、省、市的经济和信息化部门、电网企业根据全年电量和负荷预测，制定发电机组的发电计划。本研究模型的构建也因此从电力调度末端——城市为基本单元入手，分别建立城市宏观模型和微观模型：

- 宏观模型：从城市宏观层面出发，测算未来电动汽车规模化接入电网后对城市发电量、电力平衡的影响，其结果可用于制定未来电力计划、中长期购电计划乃至中长期发电容量计划。
- 微观模型：从城市微观配电网的不同（如居住、办公、商业等场景）出发，定量模拟电动汽车规模化接入电网后对局部配变系统的影响，以及电动汽车与电网融合的措施对缓解这一影响所发挥的作用。其结果可用于规划配变增容，或者利用有序充

电等措施进行削峰填谷。

在模型输入和参数上，宏观模型和微观模型的差异包括以下几点（见表1）：

- 车辆规模和类型：从车辆规模看，宏观模型的车辆规模为城市电动汽车的总量，微观模型的车辆规模为某个微观场景（如居住小区、办公楼）所对应的电动汽车数量。从车型看，本文宏观模型考虑电动乘用车、电动公交车、电动出租车的充电行为和对电网的影响；由于数据缺陷，没有将轻型电动物流车纳入考虑范畴；鉴于轻型电动物流车数量有限、充电功率不高（见专栏三），其数据缺失对电网宏观影响的分析不会产生太大影响。微观模型则以私家电动汽车为主，具体原因见第4.3节说明。
- 充电规律：宏观模型中的充电起始时间为高度聚合后的城市层面各车型的充电起始时间，由大数据分析推导得出。微观模型中的充电起始时间为具体场景下电动汽车充电时间的概率分布，由于电动汽车分散到微观场景后数量有限，因此这部分数据主要基于文献总结与假设得出。
- 电网影响：宏观模型考虑电动汽车充电对城市日用电负荷曲线的影响，而微观模型则考虑电动汽车充放电对配电网日用电负荷曲线及配变的额定容量上限的影响。城市日负荷曲线不同于配电网微观场景的日负荷曲线。



表 1 | 本研究宏观模型与微观模型差异对比

		情景分类及说明	模拟车型	模拟城市
宏观模型	无序充电	在未来不同推广规模、充电功率下，预测城市电力系统负荷的变化。	私家电动汽车、电动公交车、电动出租车	北京、苏州
	无序充电	在居住、办公、商业场景中，预测不同推广规模、充电功率与充电行为（同时率）下，配变系统受到的影响。		
微观模型	车网协同	在居住场景中，预测不同电动汽车与电网协同措施的局部负荷和削峰填谷的效果。	私家电动汽车为主	一般城市

在充电策略的选择上，宏观模型和微观模型也存在差异：宏观模型仅涉及“无序充电”策略，未考虑“车网协同”策略。微观模型则包括“无序充电”和“车网协同（包括有序充电和双向充放电）”两个策略。宏观层面未考虑“车网协同”策略的原因在于：电动汽车在一天不同时间的可调度电量较难确定，预测误差较大（详见第4.2节对“车网协同”策略的说明）；而微观场景中，电动汽车的可调节时间与电量较易预测。

## 4.2 蒙特卡洛随机模拟

虽然电动汽车（特别是私家车）的出行、充电行为具有较强随机性，但也符合概率密度函数分布特征，因此本研究将采用蒙特卡洛随机模拟方法，以第二章中电动汽车出行与充电规律为基础拟合概率密度函数，以“天”为单位，模拟未来电动汽车充放电在不同情景下的日负荷曲线。

该随机模拟的过程包括：对每辆电动汽车进行蒙特卡洛随机抽样，得到其在一天中的接入时间/充电起始时间、充电起始SOC及停车时间。依据不同充电策略（无序充电、有序充电或者电动汽车双向充放电）计算单车每隔15分钟的充（放）电负荷，并加总得出各个情景下电动汽车在一天不同时间段的充（放）电总负荷。如此往复循环，直至蒙特卡洛抽样样本数达到设定值，最后输出规模化电动汽车充电负荷曲线的期望值及均方差。

上述蒙特卡罗模型同样应用于宏观模型（见图20）和微观模型（见图21）。

其中，不同充电策略（即无序充电、有序充电和电动汽车双向充放电策略）下电动汽车充（放）电负荷计算方法如下：

- **无序充电策略：**电动汽车接入电网时刻即为起始充电时刻，充电过程中功率保持不变，无放电操作（见图17）。该策略下，通过蒙特卡洛随机抽样得到每辆电动汽车的充电起始时间和日行驶里程，充电起始SOC通过抽样的日行驶里程推导出，假设充电终止SOC为100%，进而可得出充电时长。计算公式如下：



图 17 | 无序充电推导过程示意

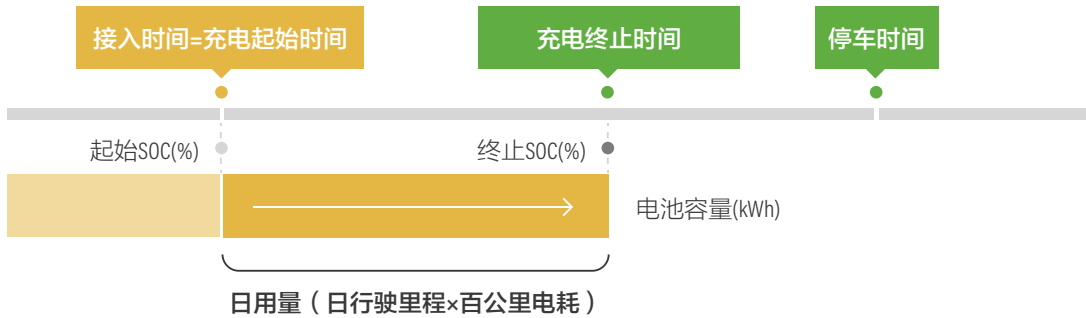
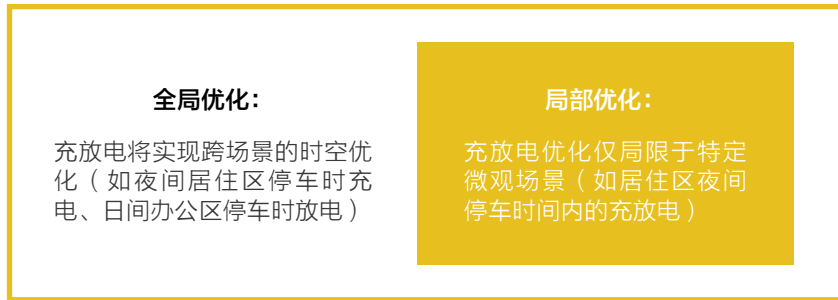


图 18 | 协同策略中的全局优化与局部优化



**充电起始SOC计算公式：**电动汽车*i*的起始SOC取决于充电前所消耗的电量 and 上一次充电结束时的电量。假设上一次充电结束时SOC为100%，则充电起始SOC为：

$$StartSOC_i = (1 - \frac{d_i \times h}{C}) \times 100\% \quad (\text{公式1})$$

**充电时长计算公式：**在固定充电功率下，日里程消耗的电量决定了车辆*i*的充电持续时间。电动汽车*i*充电时长可按如下公式计算：

$$T_i = \frac{d_i \times h}{P_c \times \varphi} \quad (\text{公式2})$$

公式1和公式2中：*d<sub>i</sub>*为电动汽车*i*的日行驶里程，*h*为每公里耗电量，*C*为电池的容量，*P<sub>c</sub>*为充电功率，*φ*为充电效率。

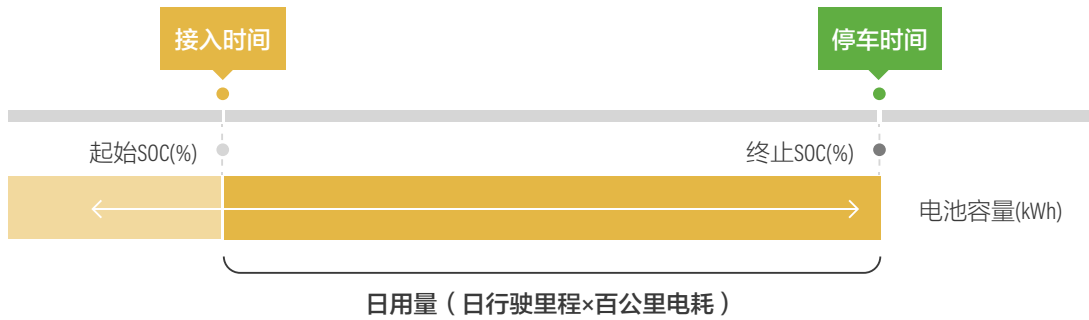
- **车网协同策略：**协同策略包括有序充电及电动汽车双向充放电。与无序充电不同，协同策略将在电动汽车接入时间、停车时间界定的更长时间窗

中，优化电动汽车的充（放）电负荷——即充电将不延续无序充电的“先到先充”，而是优化充电时间、充电功率，以达到实现相应目标优化（如本地配电网负荷的峰谷差最小化）的目的（见图18）。较之有序充电策略，双向充放电策略的约束条件更复杂，需要约束电动汽车剩余SOC，使其不会过度放电。

事实上，除了对充电时间、功率进行优化外，还可在更广泛意义上对充（放）电的地点进行优化（如日间办公场所放电、夜间居住小区充电），但由于本研究锁定某一个固定的微观场景内做局部优化，因此模型算法将不涉及不同充（放）电地点、跨场景的优化（见图19）。出于同样的原因，本研究也不考虑城市宏观模型中的协同策略。

无论有序充电还是双向充放电的策略，本模型均采用线性规划（LP）的方法实现优化。其中，采用蒙特卡洛方法抽样得到每辆电动汽车的接网时间（推导接网时车辆的初始SOC）和停车结束时间，

图 19 | 协同策略推导过程示意



并在该时间窗内根据不同约束条件对充（放）电时间及功率 $P^{charge}_{i,t}$ 和 $P^{discharge}_{i,t}$ 进行调节，实现目标优化。其中，有序充电的可调度时间更灵活、约束条件较少，双向充放电的可调度时间有限、约束条件较多（本模型中约束放电情况下电池每一刻SOC状态不低于30%）。双向充放电的优化公式如下：

双向充放电示例：

目标函数 (公式3)

最小化（日总负荷峰值-日总负荷谷值）

日总负荷峰值 =  $\max_{1-N}$  (基础负荷 $_t$  + EV有序充电负荷 $_t$  + EV放电负荷 $_t$ )

日总负荷谷值 =  $\min_{1-N}$  (基础负荷 $_t$  + EV有序充电负荷 $_t$  + EV放电负荷 $_t$ )

$$EV有序充电负荷_t = \sum_{i=1:Veh} P^{charge}_{i,t}$$

$$EV放电负荷_t = k \times \sum_{i=1:Veh} P^{discharge}_{i,t}$$

式中：基础负荷 $_t$ 、EV有序充电负荷 $_t$ 、EV放电负荷 $_t$ 分别为一天中 $t$ 时刻的负荷， $N$ 为一天的总时刻数， $Veh$ 为所有参与优化的电动汽车总数， $P^{charge}_{i,t}$ 和 $P^{discharge}_{i,t}$ 分别为电动汽车 $i$ 在不同时刻的充放电功率， $k$ 为放电效率，一般取90%。

约束条件： (公式4)

$$\square SOC_{i,starttime(i)} = StartSOC_i$$

$$\square SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} + P^{charge}_{i,t-1} \times \frac{1}{4} \times \frac{\varphi}{C} + P^{discharge}_{i,t-1} \times \frac{1}{4} \times \frac{k}{C}$$

$$\square SOC_{i,t} \geq 30\%$$

以上两个公式中

$$t \in [starttime(i), endtime(i)]$$

$$\square SOC_{i,endtime(i)} \in [StartSOC_i + \frac{d \times h}{C}, 100\%]$$

$$\square P^{charge}_{i,t} \times P^{discharge}_{i,t} = 0$$

$$\square P^{charge}_{i,t} \in [3,7], P^{discharge}_{i,t} \in [-7,-3]$$

式中： $starttime(i)$ 、 $endtime(i)$ 分别为电动汽车 $i$ 的接入时间和停车结束时间，通过蒙特卡洛抽样获得， $SOC_{i,t}$ 为电动汽车 $i$ 在各个时刻 $t$ 的情况， $C$ 为电池的容量， $\varphi$ 为充电效率， $k$ 为放电效率， $1/4$ 为充电时间，以15分钟为间隔。

图 20 | 宏观模型流程图

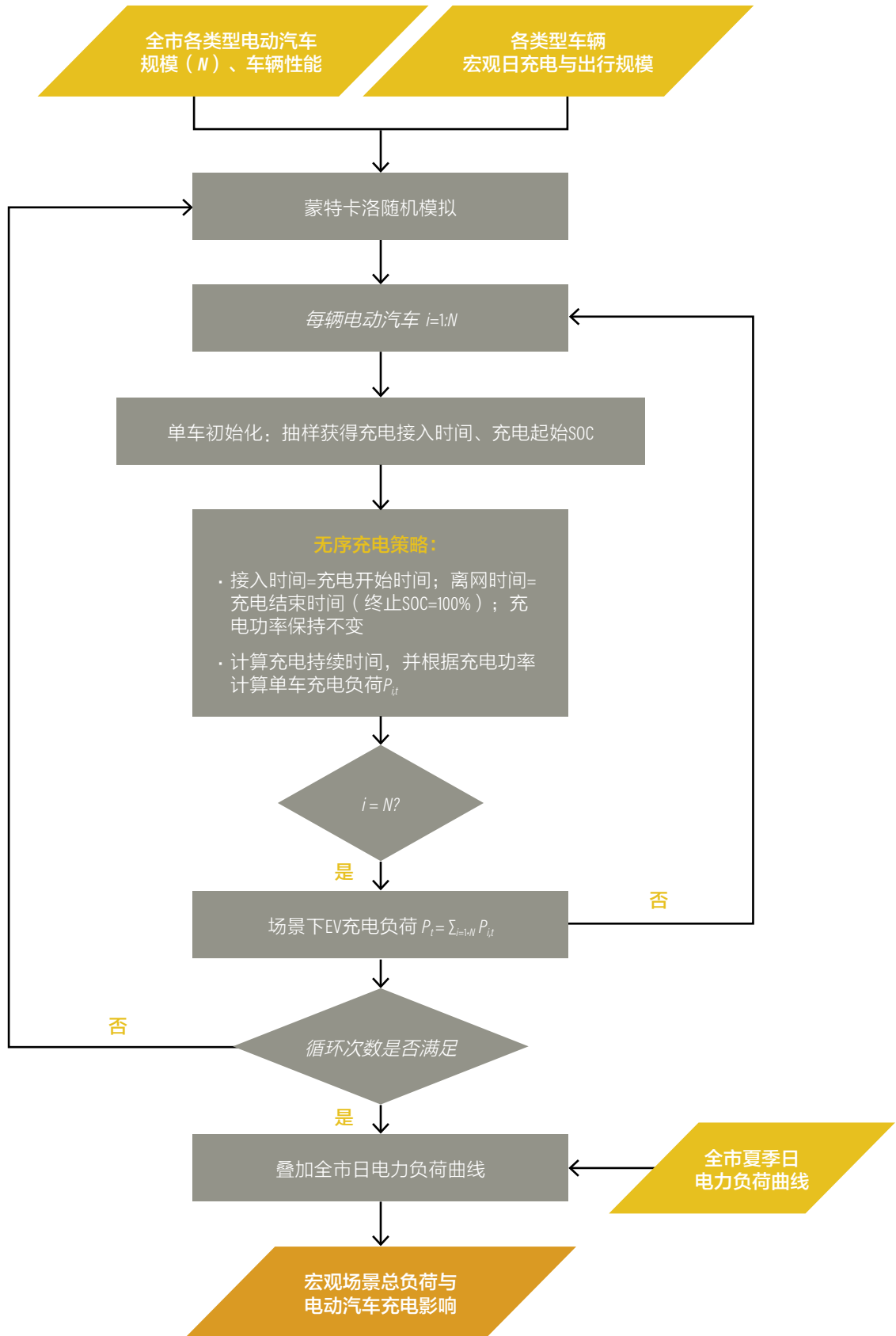




图 21 | 微观模型流程图

a. 无序充电

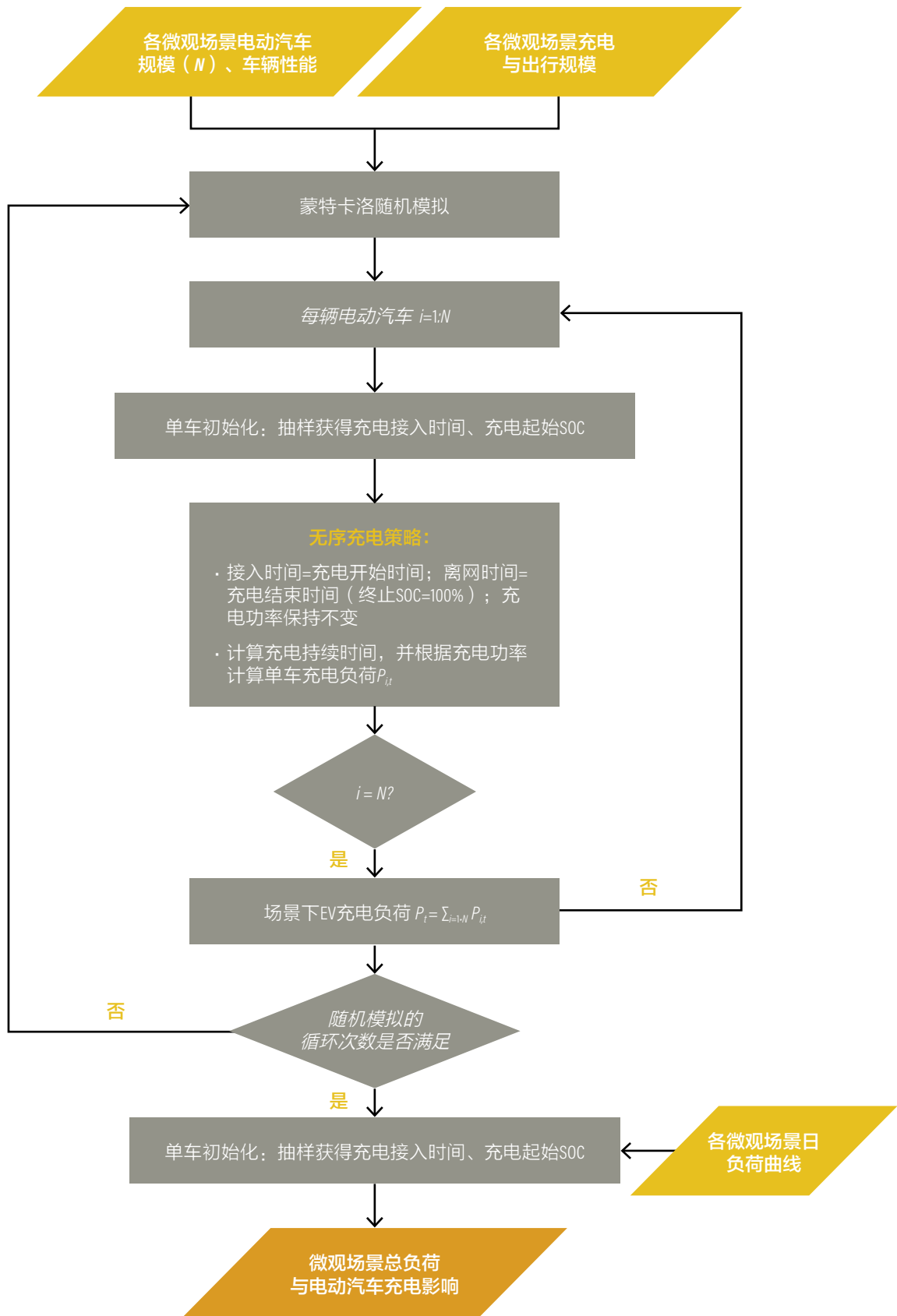
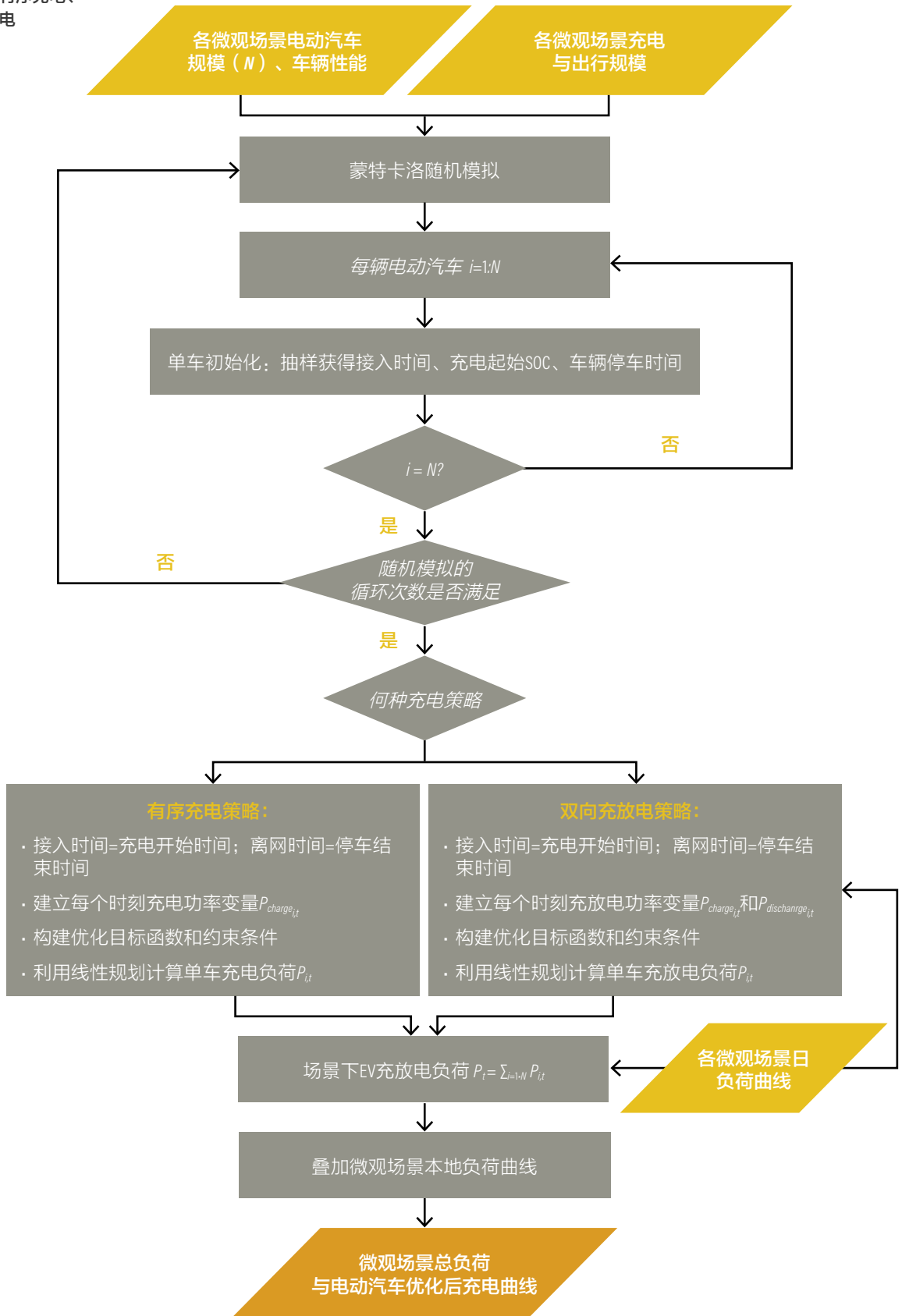


图 21 | 微观模型流程图（续）

b. 智能控制有序充电、双向充放电



### 4.3 模型假设

本模型主要隐含两个重要假设：

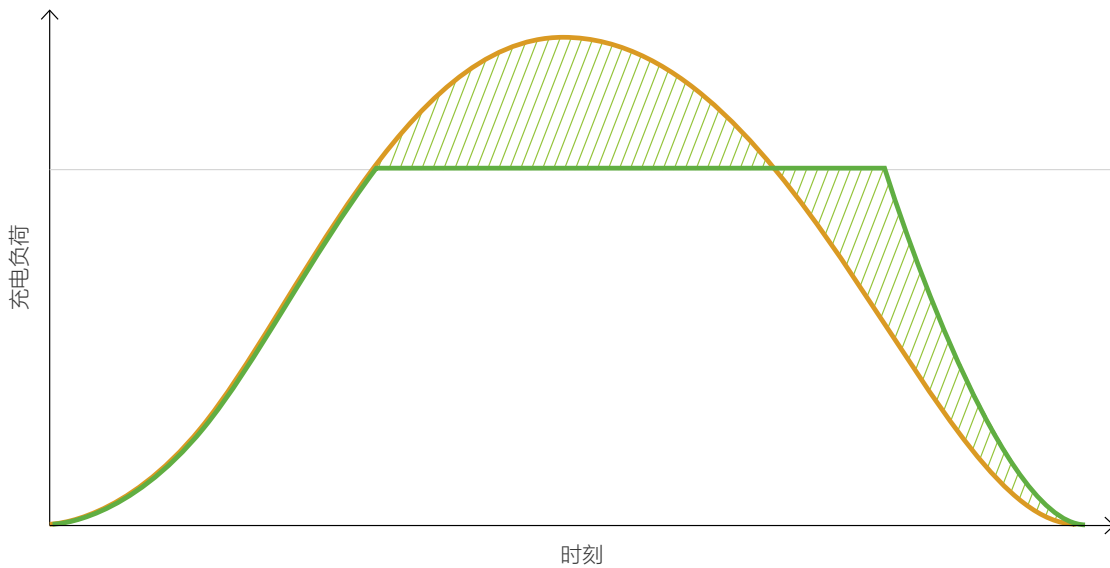
■ 在出行与充电规律上，本研究的前提假设为：私家电动汽车充电频率以慢充的“一天一充”或快充的“多天一充”为主，充电终止SOC通常为100%，且充电开始时间符合一定的概率密度分布规律。由于假设所有车辆充满电，所估算出的负荷和用电量将为上限值。而值得注意的是，该假设更适用于私家电动汽车。在微观情景下，电动公交车和电动货车的充电行为并不符合上述假设：一是由于电动公交车和电动货车日行驶里程较长，充电频率更高，可能会存在“一天多充”的情况；二是电动公交车和电动货车一般按照行车计划表运行，所以充电起始时间与行车计划表基本一致；三是电动公交车和电动货车每次补电量与补电时长也与行车计划表紧密相关，所以白天每次补电未必补到100%；四是采用蒙特卡洛模型的前提是出行与充电行为必须具备一定随机

性，可通过概率密度分布规律进行描述，而电动公交车和电动货车出行和充电行为更为确定——即由行车计划表安排。综上，理想情况下，微观场景中，营运电动汽车对配电网的影响应结合行车计划表进行计算，不需要通过蒙特卡洛的概率方法进行计算。

■ 充电桩数量充足：由于充电开始时间分布没有考虑充电桩不足所带来的车辆排队等待时间，因此本模型的重要假设是所有车辆都能找到对应的充电桩。该假设同样对模型结果的影响有限，因为车辆只要有充电需求时都能进行充电，所以模型得出的是充电负荷上限。若充电桩数量不足，车辆需要排队等待充电，其影响为：一是充电峰值负荷将受充电桩数量限制，低于没有充电桩限制的情景；其负荷峰值可直接利用充电桩数量与单桩充电功率估算得到。二是充电峰值时间可能在该峰值水平上维持一定时间；对比没有充电桩限制的情景，部分充电需求被转移到较晚的时间发生（见图22）。

图 22 | 充电桩数量充足与不足条件下电动汽车充电负荷曲线示意图

■ 充电桩数量充足    ■ 充电桩数量不足









## 第五章

# 电动汽车无序充电 对电网的影响

### 5.1 宏观层面： 无序充电对电网的影响

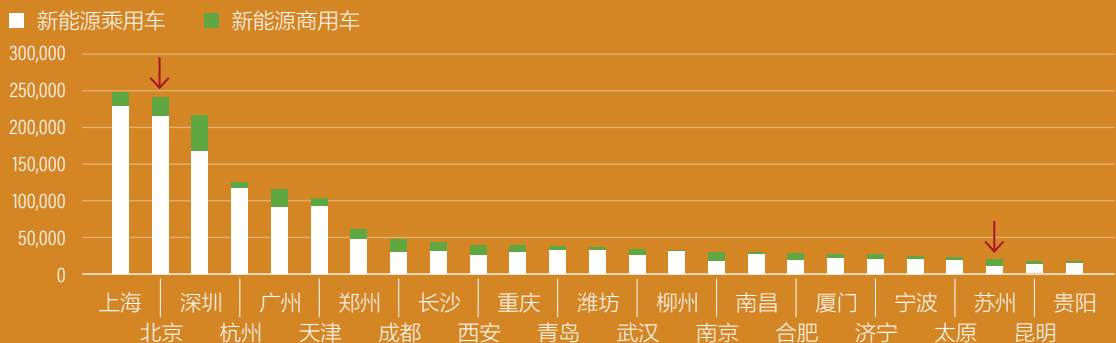
鉴于电动汽车对电网的宏观影响具有明显的“本地化”特征，电动汽车充电对电网的影响需要根据城市特点和不同情景做具体分析。本文选择中

国两个有代表性的城市进行分析。第一个城市为北京，代表电动汽车规模大、市场占有率高，充电以公共快充为主的城市；另一个城市为苏州，在新能源汽车规模和充电桩可得性上与北京形成差异，代表新能源汽车规模中等，充电以私人慢充为主的城市（见专栏四）。

#### 专栏 4 | 北京、苏州新能源汽车和电力发展概况

从新能源汽车发展看，苏州和北京处于不同阶段。在限行限购、补贴等多重政策推动下，近几年北京市新能源乘用车市场发展迅速，2018年销量比例达到14.6%，当年北京市新能源乘用车保有量21.3万辆，位列全国第二。相对北京而言，苏州的新能源汽车发展较慢，2018年苏州新能源乘用车保有量仅为0.88万辆；但较全国其他城市，尚处于中等发展速度，其2018年新能源乘用车数量位列全国第23位（见专栏图6）。

专栏图 6 | 2018年全国新能源汽车保有量前25名城市（单位：辆）



数据来源：中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心

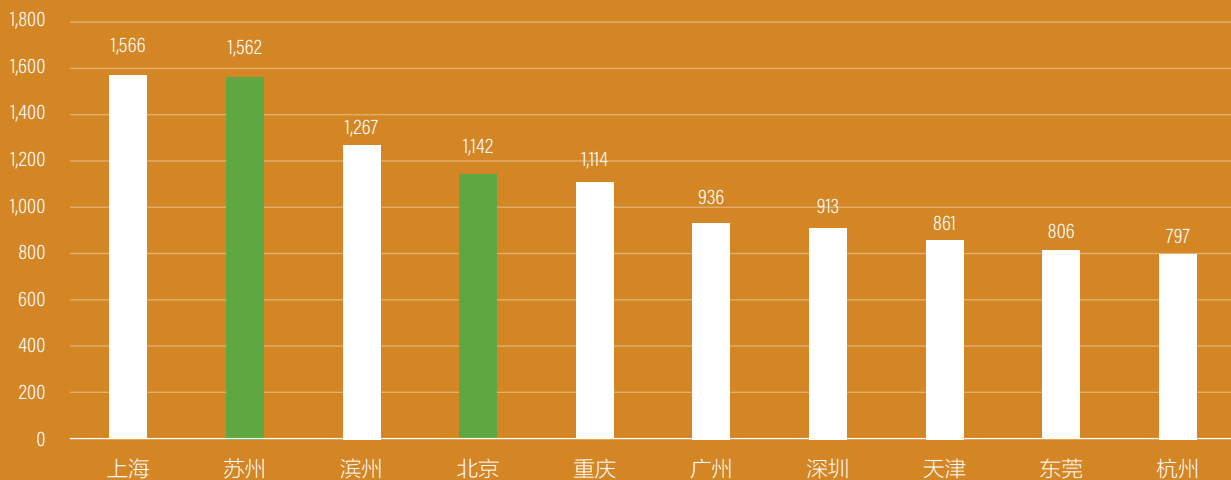
## 专栏 4 | 北京、苏州新能源汽车和电力发展概况（续）

从用电量看，北京和苏州的用电量均很高，但用电结构存在差异。

北京是全国用电量排名第四的城市，2018年全社会全年用电量为1142亿千瓦时。苏州是全国用电量排名第二的城市，2018年全社会全年用电量达1562亿千瓦时，仅次于上海，超出北京420亿千瓦时（见专栏图7）。

而两个城市的用电结构存在一定差异。苏州产业结构更偏向于工业，以工业用电为主；而北京以居民用电和第三产业用电为主。二者在用电结构上的差异也体现在城市用电负荷上的差异（见第5.1.2节和第5.1.3节）。

专栏图 7 | 2018年全社会全年用电量前10名城市（单位：亿千瓦时）



数据来源：各城市统计局

在情景设置上，本文选择两个情景——基准情景和激进情景。其中，基准情景与现有政策趋势相一致，是未来技术和政策最可行的情景；而激进情景则力图将电动汽车对电网的影响最大化，相当于电动汽车对电网的影响上限。

### 5.1.1 宏观层面影响因素分析

电动汽车对电网的影响（电量或负荷）不仅取决于车辆规模，也取决于充电功率、充电行为等因素，与本地用电负荷的时间分布特征也相关。

#### ■ 不同车型电动汽车规模

城市电动汽车车队规模扩大势必会导致更多电动汽车充电负荷集中接入，造成全网负荷的增加。

针对不同车型，本研究采用中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心的最新研究（2019），基于消费者选择模型，结合城市未来不同政策路径，按照车辆自然淘汰规律（即不考虑燃油车队的加速淘汰），对不同燃料和技术间的车辆购置使用综合成本、充电便利性等相对关系进行测试，并得到城市未来不同车型纯电动车的规模。

在北京，基准情景下，假设将于2030年出台“禁售燃油乘用车（禁燃）”政策，即在目前小客车限购政策中，将新能源汽车指标占比由目前的59%提高至100%。在此政策影响下，北京新能源乘用车2050年销量占比为72.4%——乘用车当年车销量中传统车部分来自车辆换购，而新能源汽车届时保有量占比将达到66.5%。在激进情景下，假设将于2025年起执行传统车新车“禁燃”政

策，比基准情景提前5年。在此基础上，假设自2030年开始，在新车“禁燃”政策基础上，对所有换购车辆执行“禁燃”政策——即新能源销量占比达100%。在这些政策的共同影响下，2050年北京新能源乘用车保有量占比将几乎达到100%（见表2、表3和图23）。

在苏州，基准情景下，2050年新能源汽车保有量占比为50.8%。激进情景下，苏州也将引入“禁燃”政策，并于2038年实施。激进情景下，苏州2050年新能源汽车保有量占比达84.8%，其中出租车和城市公交车将实现100%电动化（见表2、表3和图24）。

表 2 | 北京和苏州新能源汽车推广情景假设

情景	北京		苏州	
	基准情景	激进情景	基准情景	激进情景
2020年	公交车全部电动化 出租车全部电动化	公交车全部电动化 出租车全部电动化	--	--
2025年	--	新上牌私人用车全部电动化	公交车全部电动化 出租全部电动化	公交车全部电动化 出租全部电动化
2030年	新上牌车辆全部电动化	私人用车换购时全部电动化	--	--
2038年	--	--	--	新上牌私人用车全部电动化

表 3 | 北京和苏州2035年和2050年不同情景下新能源汽车各车型保有量（单位：万辆）

情景	北京		苏州	
	基准情景	激进情景	基准情景	激进情景
新能源乘用车保有量（新能源乘用车在乘用车中占比）				
2035年	270（41%）	466（71%）	124（22%）	124（22%）
2050年	448（67%）	673（100%）	307（50%）	489（81%）
新能源公交车保有量（新能源公交车在公交车中占比）				
2035年	3.0（100%）	3.0（100%）	0.6（100%）	0.6（100%）
2050年	3.0（100%）	3.0（100%）	0.6（100%）	0.6（100%）
新能源出租车保有量（新能源出租车在出租车中占比）				
2035年	6.7（100%）	6.7（100%）	0.6（100%）	0.7（100%）
2050年	6.7（100%）	6.7（100%）	0.6（100%）	0.7（100%）

说明：括号中为新能源汽车保有量占比。预测结果显示，2050年新能源汽车将以纯电动车为主。  
以常住人口计算，2050年苏州的千人乘用车保有量在450辆左右，2050年北京千人乘用车保有量约在300辆左右（假设常住人口不变）。



图 23 | 北京市2050年乘用车分车龄保有结构预测

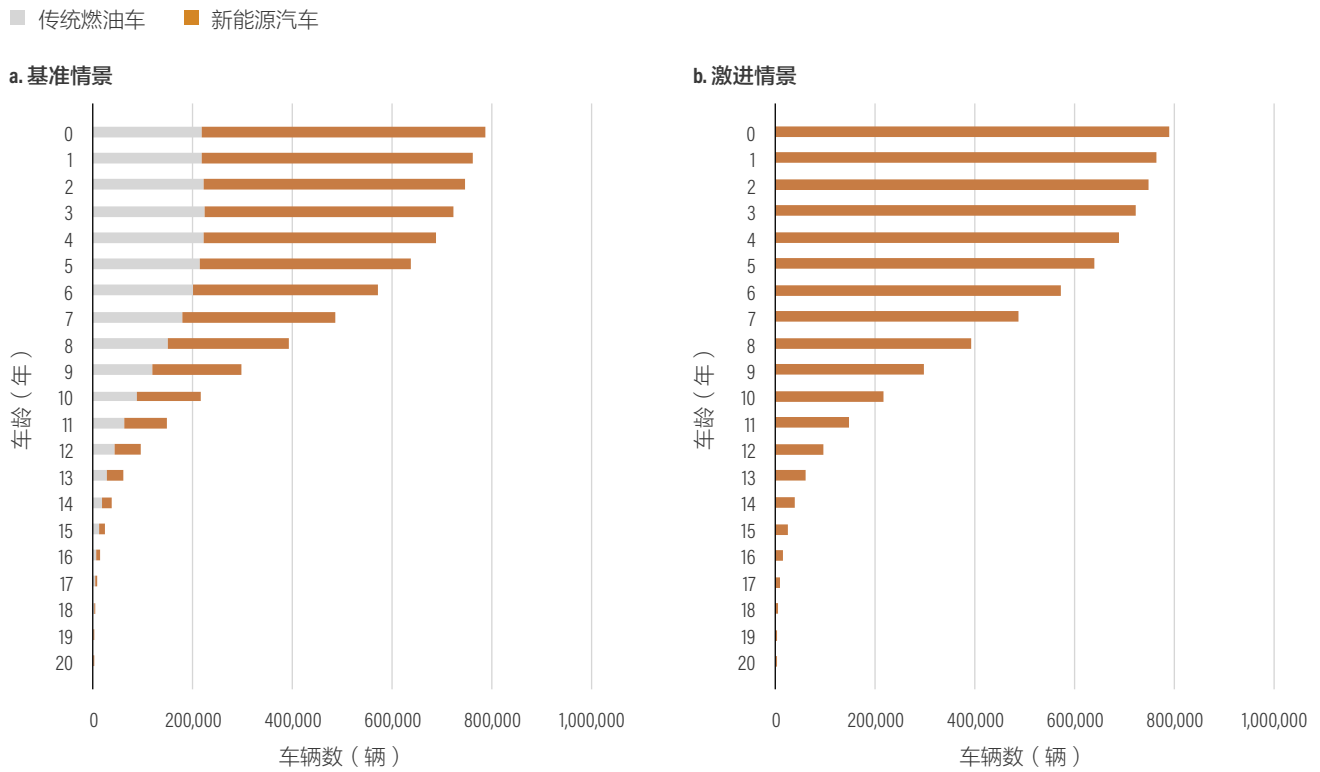
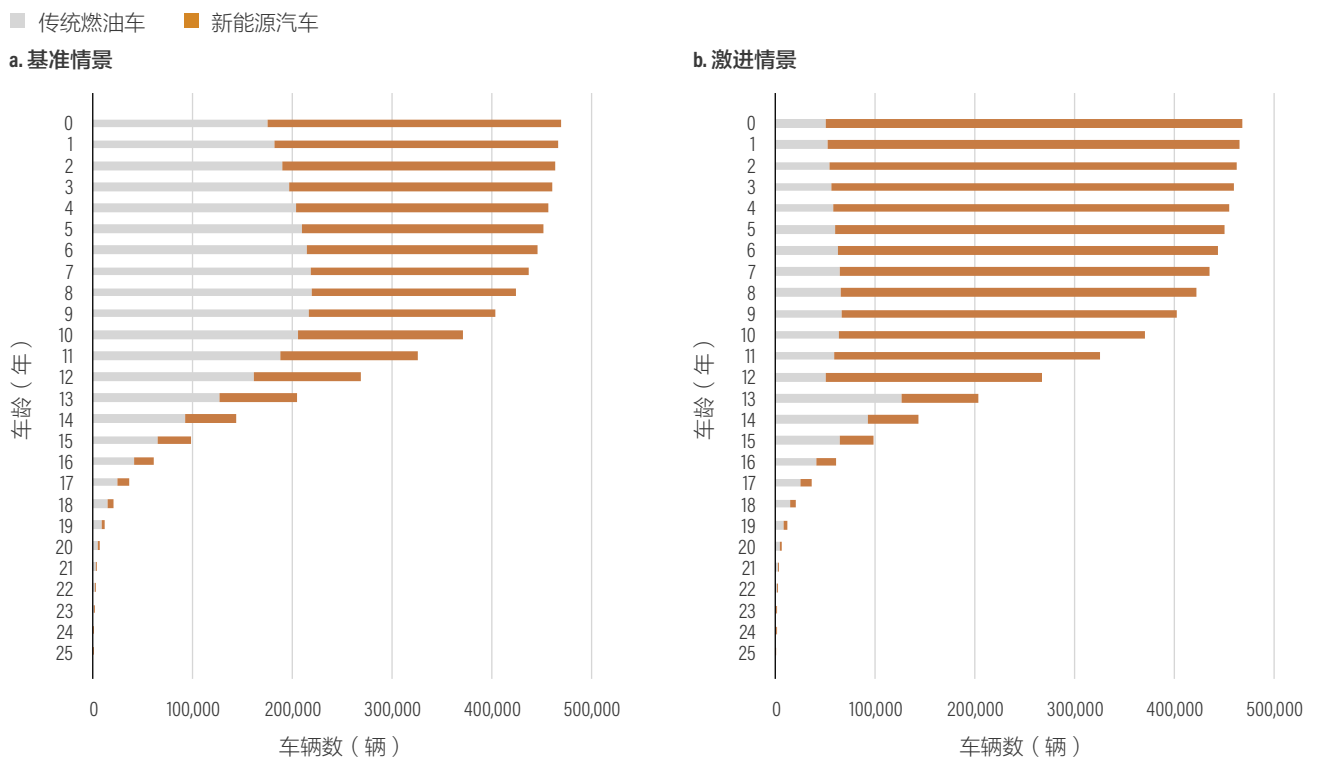


图 24 | 苏州市2050年乘用车分车龄保有结构预测



■ 未来充电功率和快充占比

对私家电动汽车而言，未来快慢充占比情况也将影响全社会的充电起始时间曲线变化情况，特别是决定未来的充电时间将集中于夜间还是白天。

无论从桩侧、车侧还是电池测，大功率快充在技术和市场上取得突破将指日可待，而大功率快充的功率将是目前主流慢充功率（3.5kW）的100倍，对电网的冲击也将更大（中国电动汽车百人会 2018）。本文对私家电动汽车未来充电功率的预测见表4。

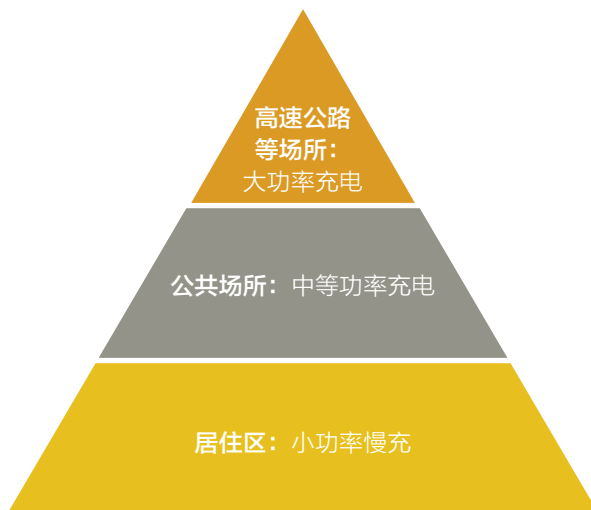
在城市快慢充比例上，随着大功率快充商业化，不同城市在充电类型选择上会呈现异质化（见图25）。一些大型城市的停车位数量短缺，充电桩建设会面临先天制约，如北京和广州；另一些城市的老旧小区电网容量不足、缺乏配电网扩容条件，如西南地区的城市。以上两种情况下，在未来，城市相对更加依赖公共快充，快充占比可能相对更高。而在一些停车位充分、配电网容量充足的城市，可能仍会沿用目前慢充为主的模式，快充占比虽然会上升，但仍然会以慢充为主流。

表 4 | 本研究宏观模型中未来私家电动汽车主流充电功率假设

	2017年	2035年	2050年
慢充平均充电功率	3.5kW	7kW	7kW
快充平均充电功率	20kW	基准情景：120kW 激进情景：140kW	基准情景：192kW 激进情景：224kW

图 25 | 中国城市未来快充发展趋势分类

a. 趋势一：以慢充为主的城市

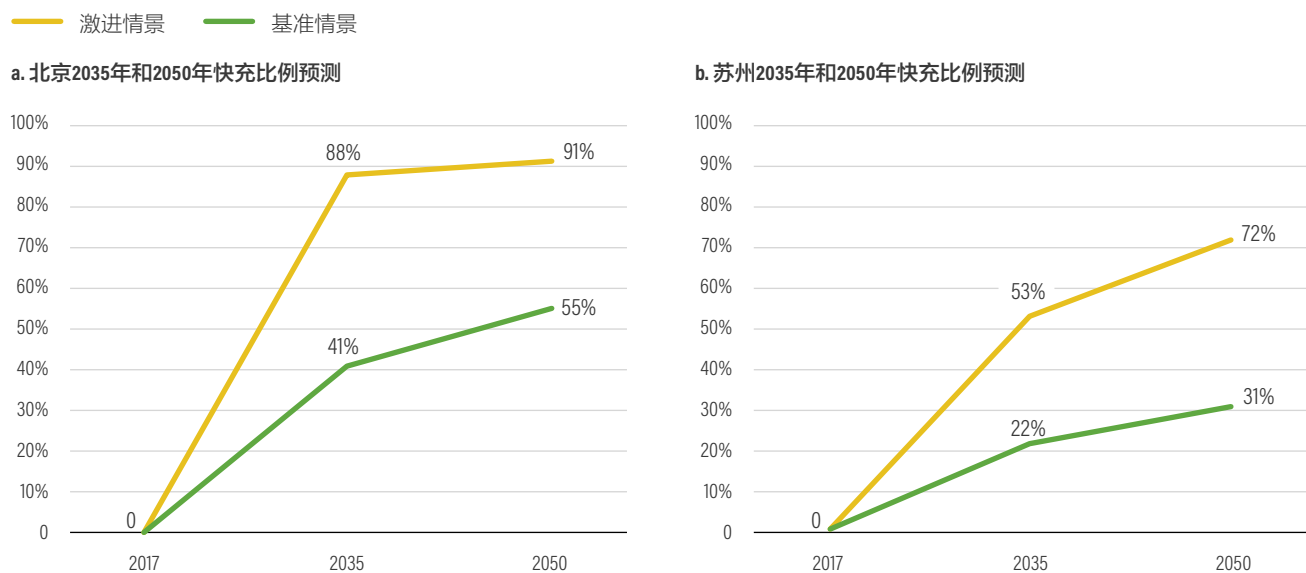


b. 趋势二：以快充为主的城市



说明：金字塔中，不同形状的面积代表不同类型的充电占比。

图 26 | 北京、苏州未来快充比例预测（仅含乘用车和出租车）



说明：快充比例为快充次数在总充电次数中的比例。

本研究中的北京市是“趋势二：以快充为主的城市”的典型代表，考虑北京市停车位数量限制、夜间停车位供需矛盾<sup>3</sup>（约50%的私家车没有停车位），以及15%的高速出行里程比例，本文预测北京在基准情景与激进情景下都将快充为主，两个情景的差异主要体现在快充比例上（见图26a）。基准情景下的快充比例以私家车停车位数量为基础进行预测，激进情景下则考虑绝大部分充电方式为快充的极端情景。

在苏州，停车位相对北京更加充足一些，特别是在苏州工业园区、苏州高新区等新城区。因此，本研究预测，苏州慢充将比北京更为普及。鉴于此，苏州在基准情景下以慢充为主，快充比例比目前略高。在激进情景下，为分析极端条件下——即大比例快充对电网的影响，将苏州快充比例提高至与北京基准情景相近的水平（见图26b）。

#### ■ 未来快充充电规律

在大功率快充下，未来城市快充的充电规律也会与目前有所不同（见表5）。随着里程焦虑得到缓解，快充充电规律特征或与现阶段快充规律类似，或与燃油车加油规律接近：

- 充电频次：未来，私家电动汽车慢充可能仍延续目前“一天一充”行为特征，日充电量与日行驶里程直接相关；私家电动汽车快充的频率可能会比现状更低，与燃油车趋同，而充电量与电池实际容量相近。
- 充电开始时间：未来，快充的充电开始时间可能与目前快充开始时间类似，或与当前燃油车加油规律近似。

不同的快充行为规律对电网带来的影响不同，由于燃油车加油数据限制，本文假设未来快充的充电开始时间分布特征与现状基本一致，并以“五天一充”为主（见表5）。



表 5 | 本研究宏观模型中对未来充电规律的假设

	燃油车 加油规律	未来快充 充电规律	未来慢充 充电规律
应用场景	加油站	集中充电站	私人充电桩
充电（加油）频率	依据剩余里程判断 （多天一加）	多天一充为主	一日一充为主
充电（加油）起始时间	燃油车加油时间分布	现状快充开始充电时间分布 或燃油车加油时间分布	现状慢充开始充电时间分布
充电起始SOC分布	假定剩余里程不变	依据日里程、充电频率计算	依据日里程计算

表 6 | 北京2035年和2050年电动汽车日用电量预测

年份	基准情景		激进情景	
	电动汽车日用电量 （兆千瓦时）	在全社会用电量占比	电动汽车日用电量 （兆千瓦时）	在全社会用电量占比
2035年	22.5	4.4%	54.8	10.6%
2050年	30.6	5.0%	65.4	10.9%

针对北京和苏州两个典型城市，根据以上模型输入，本文采用宏观模型，以工作日的某一天为单位，建立不同情景与路径，预测不同情景下新能源汽车无序充电对全社会用电量和日负荷的影响。宏观模型结果如下。

### 5.1.2 北京：新能源汽车规模大、市场占有率高；充电以公共快充为主

从用电量看，全社会用电量以人均用电量按照1%的年均增长率计算（不含电动汽车充电量），2050年激进情景下，电动汽车日用电量约占北京全社会用电量的10.9%；基准情景下占比约为5.0%（见表6）。

从电动汽车的用电负荷看，激进情景和基准情景电动汽车的充电负荷组成、负荷曲线有显著差异（见图27和图28）：

- 激进情景——100%电动化和91%比例的快充，电动汽车充电负荷主要以私家车快充为主，充电的峰谷差也最显著（峰谷差率0.88）（见图27b）。
- 基准情景——66%电动化和55%比例的快充，充电负荷以私家车和公交车快充负荷为主；峰谷差较激进情景更缓和，这或因为公交车充电时间（以夜间为主）和私家车充电时间（以白天为主）互为补充，降低了整体电动汽车充电的峰谷差（见图27a）。



图 27 | 北京2050年基准、激进情景下分车型电动汽车充电负荷 (单位: kW)

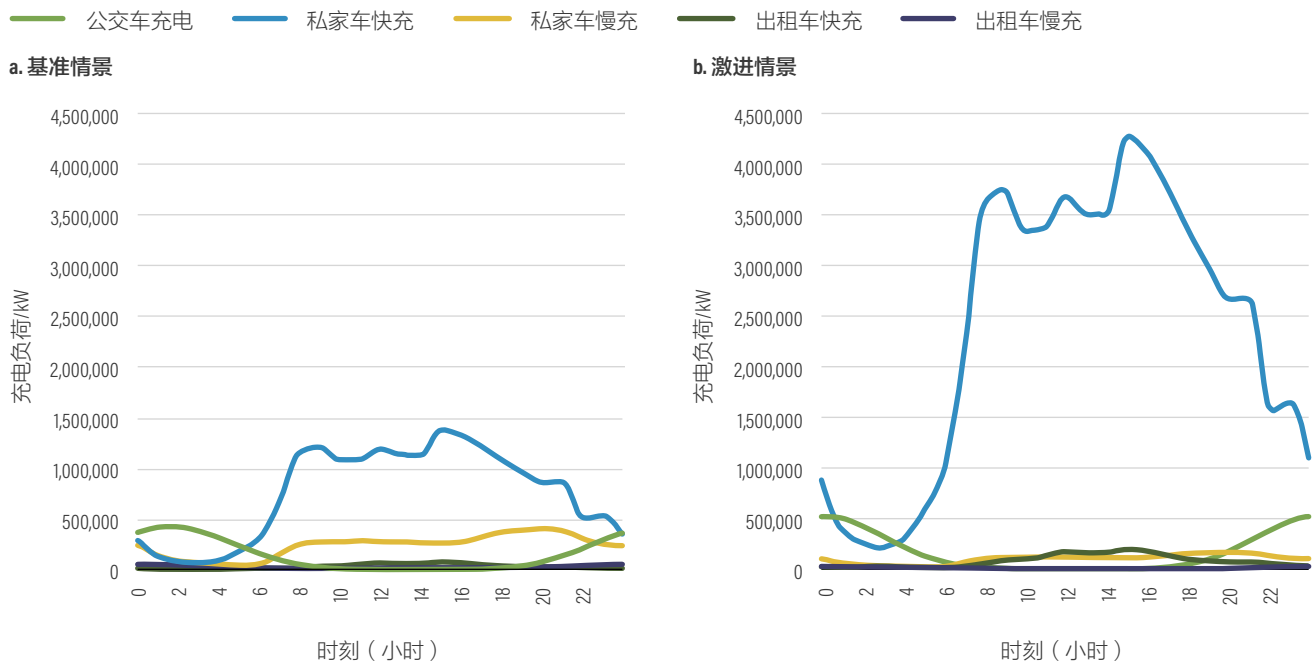
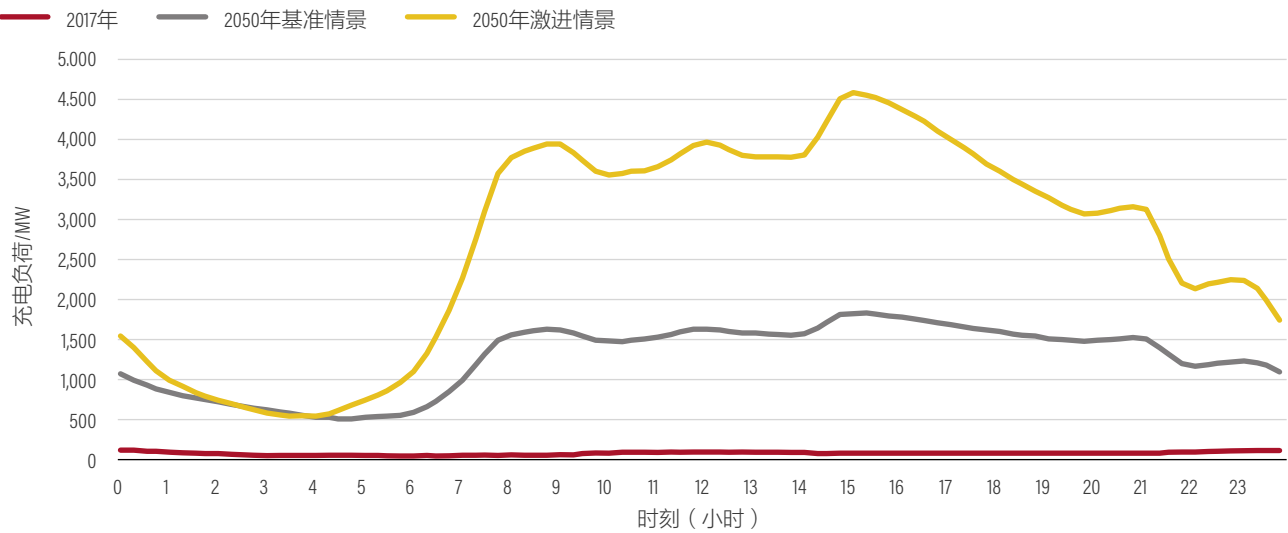


图 28 | 北京2050年电动汽车充电负荷在基准与激进情景下的比较 (单位: MW)



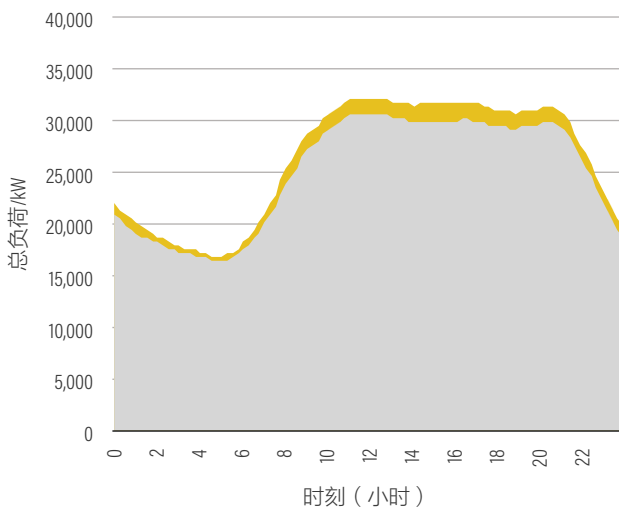
	2017年	基准情景	激进情景	基础负荷
主要充电负荷	公交车负荷	私家车快充负荷、公交车负荷	私家车快充负荷	--
平均负荷(MW)	75	1278	2726	27665
最高负荷(MW)	112	1834	4582	33918
最低负荷(MW)	34	525	536	18073
峰谷差(MW)	78	1310	4046	15845
峰谷差率	0.70	0.71	0.88	0.47

在电动汽车充电负荷叠加基础负荷后：在2050年激进情景下，全网最大用电负荷时间与基础负荷基本重叠，叠加电动汽车充电后比总负荷峰值提高3828MW，相当于五个800MW装机容量的发电厂满负荷出力。同时，日负荷的峰谷差继续扩大，峰谷差率达0.51。在2050年基准情景下，全网最高负荷比基础负荷高1615MW，比激进情景小一半（见图29）。

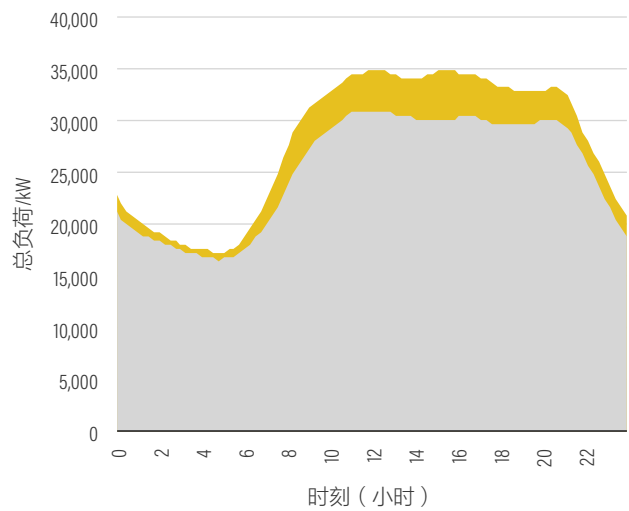
图 29 | 北京：2050年基准、激进情景夏季负荷（单位：MW）

■ 电动汽车负荷 (MW)    ■ 基础负荷 (MW)

a. 基准情景



b. 激进情景



	基准情景		激进情景	
	总负荷	与基础负荷差异	总负荷	与基础负荷差异
平均负荷(MW)	26484	1278	27932	2726
最高负荷(MW)	<b>32519</b>	<b>1615</b>	<b>34831</b>	<b>3928</b>
最低负荷(MW)	16992	525	17150	683
峰谷差(MW)	15527		17681	
负荷率	0.81		0.80	
最小负荷率	0.52	--	0.49	--
峰谷差率	0.48		0.51	
峰值时间		<b>12:25</b>		<b>11:45</b>

### 5.1.3 苏州：新能源汽车规模中等；充电以私人桩慢充为主

从用电量看，2050年苏州电动汽车的日用电量分别为基准情景的19.3兆千瓦时和激进情景的54.2兆千瓦时，低于北京的54.8兆千瓦时和65.4兆千瓦时。以人均用电量按照1%的年均增长率计算（不含电动汽车充电量），2050年激进情景下，苏州电动汽车用电量将占全社会用电量的8.6%，基准情景下的电动汽车用电量则占3.0%（见表7）。

从电动汽车的充电负荷看，苏州的充电负荷构成与北京呈显著差异（见图30和图31）：

- 激进情景——即85%电动化和72%比例的快充：电动汽车充电负荷主要为私家车快充，充电高峰集中于日间，且峰谷差显著（峰谷差率达0.91）（见图30b）。
- 基准情景——即50%电动化和31%比例的快充：充电负荷以私家车慢充和快充为主，充电高峰集中于夜间（见图30a）。

表 7 | 苏州2035年和2050年不同情景下的电动汽车日用电量

年份	基准情景		激进情景	
	电动汽车日用电量 (兆千瓦时)	在全社会用电量占比	电动汽车日用电量 (兆千瓦时)	在全社会用电量占比
2035年	9.5	1.8%	14.8	2.8%
2050年	19.3	3.0%	54.2	8.6%

图 30 | 苏州2050年基准、激进情景下分车型电动汽车充电负荷（单位：kW）

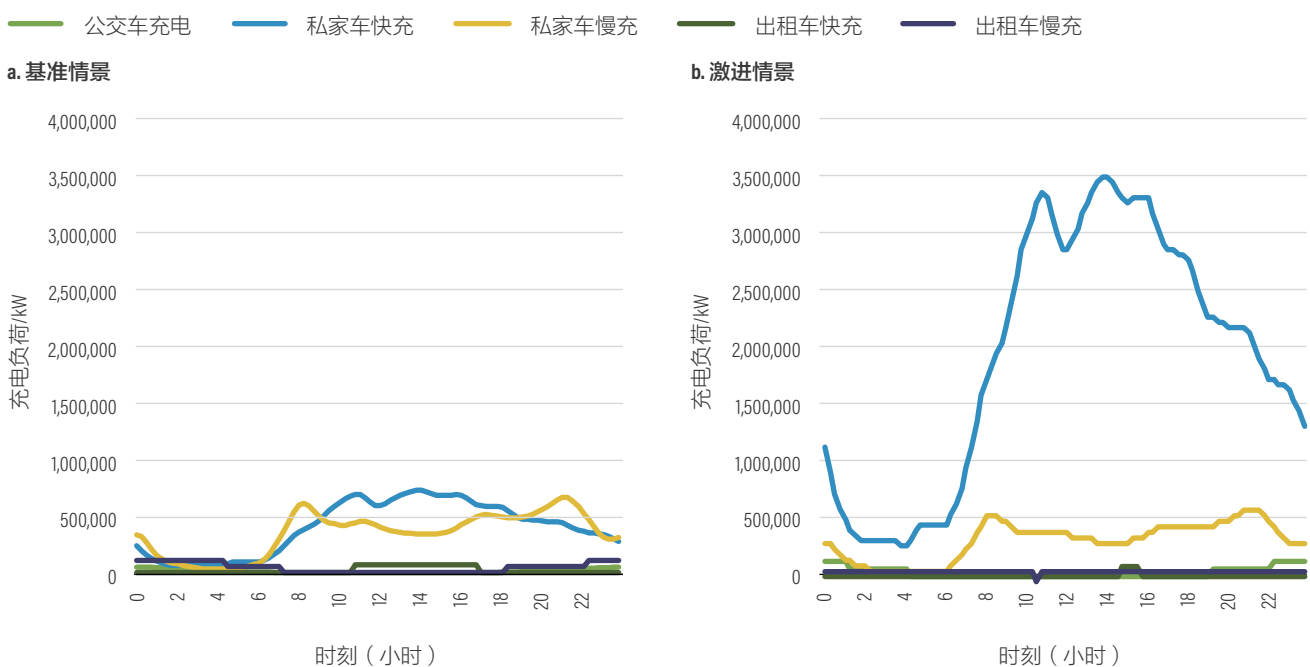
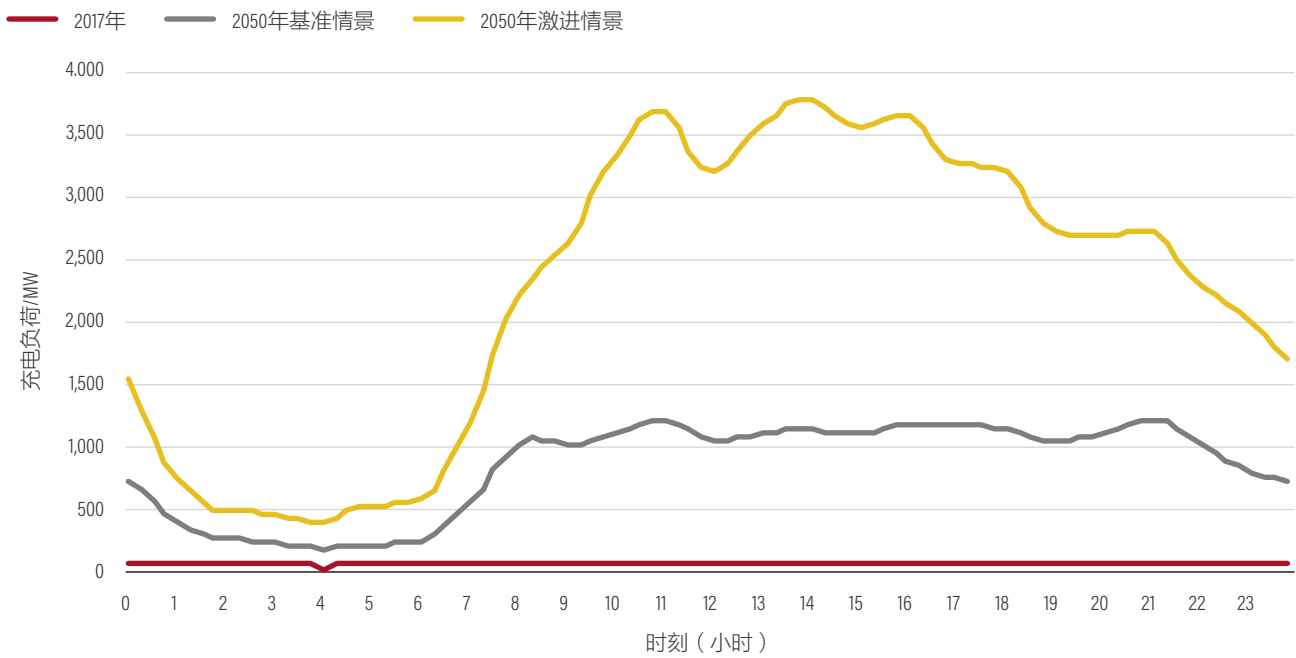


图 31 | 苏州2050年电动汽车充电负荷在基准与激进情景下的比较 (单位: MW)

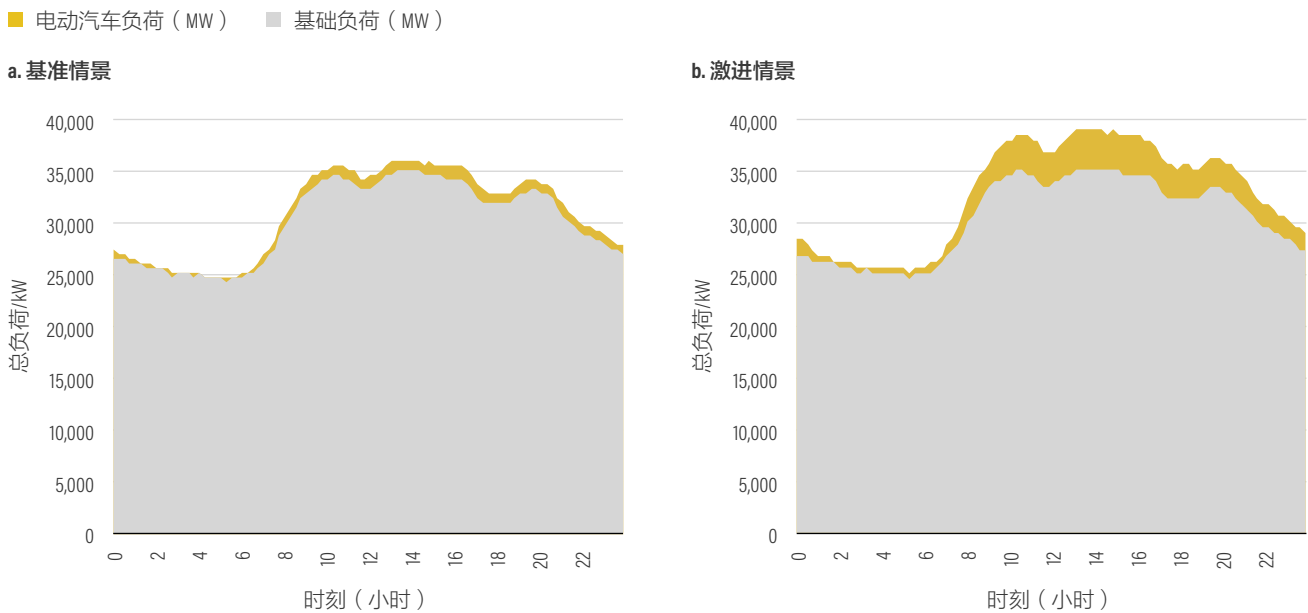


	2017年	基准情景	激进情景	基础负荷
主要充电负荷	公交车负荷	私家车慢充、快充负荷	私家车快充负荷	--
平均负荷(MW)	5	803	2259	33992
最高负荷(MW)	10	1182	3796	39414
最低负荷(MW)	0	144	354	27602
峰谷差(MW)	10	1038	3442	11812
峰谷差率	--	0.88	0.91	0.30



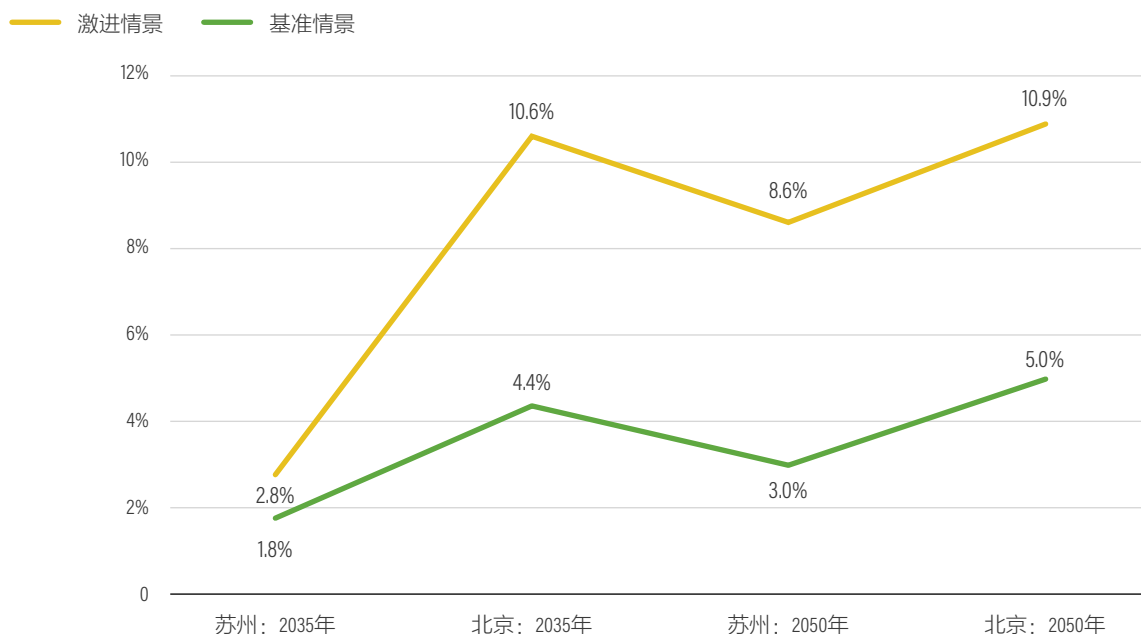
电动汽车充电负荷叠加基础负荷后：在2050年激进情景，总负荷比基础负荷（无电动汽车充电）高3787MW，日负荷的峰谷差也有所扩大；在2050年基准情景下，全网峰值负荷比基础负荷高1091MW（见图32）。较之北京，虽然苏州电动汽车充电负荷并不高——激进情景下，苏州电动汽车最大充电负荷比北京小786MW，但叠加基础负荷后，最高负荷与基础负荷差异基本相当（见图29和图32）。这意味着苏州电动汽车充电对电网的影响与北京相当。这与苏州本地的基础负荷曲线与电动汽车充电曲线重叠有关。

图 32 | 苏州2050年基准、激进情景下夏季负荷（单位：MW）



	基准情景		激进情景	
	总负荷	与基础负荷差异	总负荷	与基础负荷差异
平均负荷(MW)	31263	803	32719	2259
最高负荷(MW)	<b>36409</b>	<b>1091</b>	<b>39106</b>	<b>3787</b>
最低负荷(MW)	24911	176	25235	501
峰谷差(MW)	11499		13871	
负荷率	0.86		0.84	
最小负荷率	0.68	--	0.65	--
峰谷差率	0.32		0.35	
峰值时间	<b>14:00</b>		<b>14:00</b>	

图 33 | 基准和激进情景北京和苏州电动汽车的日用电量将占全社会夏季日用电量比例（单位：%）



## 5.1.4 总结

从宏观看，即便在全面电动化和大功率充电的未来假设下，电动车对全网的用电量、负荷可能造成的影响仍然存在较大变数。

首先，从电动汽车用电量上看，受新能源汽车推广规模差异的影响，基准情景与激进情景的结果存在较大差异。在基准情景下，2035年和2050年北京和苏州两个城市电动汽车的日用电量将占全社会夏季日用电量的1.8%~5.0%（见图33），该比例表明电动汽车用电量在全社会用电量中占比相对有限。在激进情景下，2035年和2050年，两个城市电动汽车的日用电量将占全社会夏季日用电量的2.8%~10.9%，特别是北京的电动汽车日用电量在全社会日用电量中的占比，将接近2017年中国城乡居民用电比例的13.79%（中国电力企业联合会2018）。值得注意的是，本文采用的电动汽车最大日用电量即全社会电动汽车充电同时率高的一天里的充电量，因此电动汽车用电量在全社会日用电量中的占比会在不同日期呈现波动。

其次，从电动汽车用电负荷上看：

在车型上，从图27和图30可见，虽然近期在所有车型中公交车的充电负荷最大，但未来私家车充电负荷（包括

慢充和快充）将为主要用电负荷，对电网负荷影响最大。

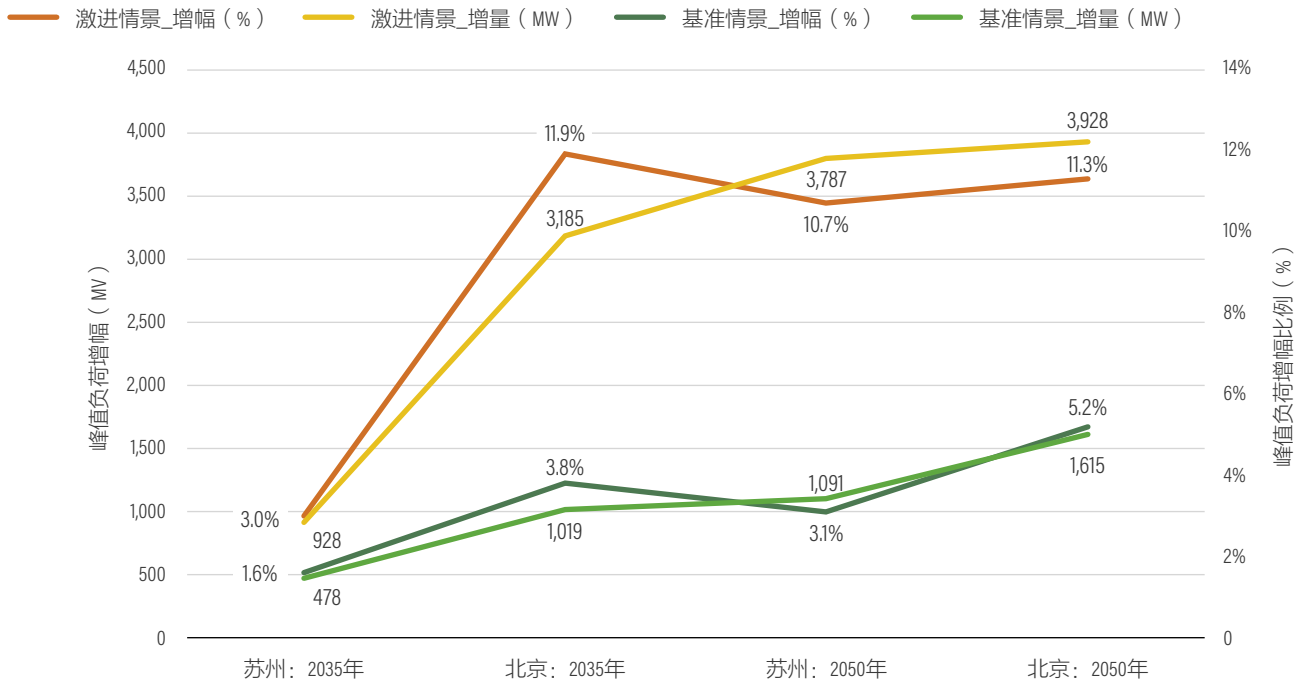
受新能源汽车推广的规模、快充普及程度等影响，未来电动汽车对电网负荷的影响呈现较大分化（见图34）：

- 当城市新能源汽车规模按照既有政策发展（即基准情景），2035年两个城市新能源汽车数量分别在300万辆以内，2050年新能源汽车数量约在450万辆以内，且慢充占比相对较高时，两个城市2035年和2050年电网峰值负荷的增幅相对有限，在1.6%~5.2%之间，最大负荷需求在478~1091MW之间；在部分地区，该增幅可被电源侧闲置的装机容量所消化。
- 当城市新能源汽车高速发展（即激进情景），2035年城市新能源汽车数量超过300万辆，2050年新能源汽车数量超过450万辆，且以快充为主，两个城市2035年和2050年电网峰值负荷的增幅将达10%~11%，最大负荷需求在928~3928MW之间；该峰值负荷增幅对电网影响较大，可能造成部分地区在电源侧、输电侧的容量缺口。

综上，未来两个城市新能源汽车对全网峰值负荷可能造成的影响幅度区间较大：2035年两个城市峰值负荷增幅大致在1.6%~11.9%区间，2050年峰值负荷增幅也在

3.1%~11.3%区间。这种不确定性不仅受新能源汽车未来推广规模的影响，也受私家车快充占比和充电同时率的影响：当快充比例高时，车辆充电功率和每次充电的电量也更高（因为充电频率低），如果快充车辆集中在同一时间充电——即充电同时率较高时，更易对电网产生较大的影响。

图 34 | 基准和激进情景下北京和苏州受电动汽车充电影响全网峰值负荷变化（单位：MW和%）



	苏州: 2035年	北京: 2035年	苏州: 2050年	北京: 2050年
<b>基准情景</b>				
新能源乘用车保有量(万辆)	124 (22%)	270 (41%)	307 (50%)	448 (67%)
新能源汽车快充频次占比(%)	22%	41%	31%	55%
<b>激进情景</b>				
新能源乘用车保有量(万辆)	124 (22%)	466 (71%)	489 (81%)	673 (100%)
新能源汽车快充频次占比(%)	53%	88%	72%	91%

说明：括号中的比例为新能源乘用车保有量在乘用车保有量中的占比。

本研究与现有文献的结论可能存在差异。例如，国网能源研究院有限公司（2018）预测电动汽车无序充电将导致2030年峰值负荷增加1.53亿千瓦，预计相当于当年峰值负荷（无电动汽车充电情景）的13.1%。该峰值负荷增幅的预测值整体高于本研究对两个城市2035年的预测范围（1.6%~11.9%），更接近本研究激进情景的分析结果。这一预测结果的差异可能源于三个因素：一是电动汽车数量规模预测的区别，二是充电开始时间分布、车辆充电同时率设定的差异，三是基础负荷增速预测的差异。其中，大量电动汽车参与快充，会加剧电动汽车充电负荷预测的不确定性，特别是对快充的充电开始时间、充电同时率（含充电频率）的不同设定，可能造成各研究结果中关于电网峰值负荷预测的明显差异。

## 5.2 微观层面：无序充电对配电网的影响

新能源汽车对电网的影响不仅体现在一天的不同时间，也体现在不同空间。例如，从图36北京市2018年9月各车型日间和夜间的充电量分布可见，城市局部地区电动汽车充电需求更高，配电网承受的冲击将更大（红点密集区）。因此，有必要针对不同微区域、场景，定量模拟配电网末端受到的影响。

配电网包含不同电压等级，住宅区、商业区和大型工业企业的配电网一般采用三级电压，即由区域变电所

图 35 | 本研究2035年预测结果与现有文献比较——电力峰值负荷增加比例（单位：%）

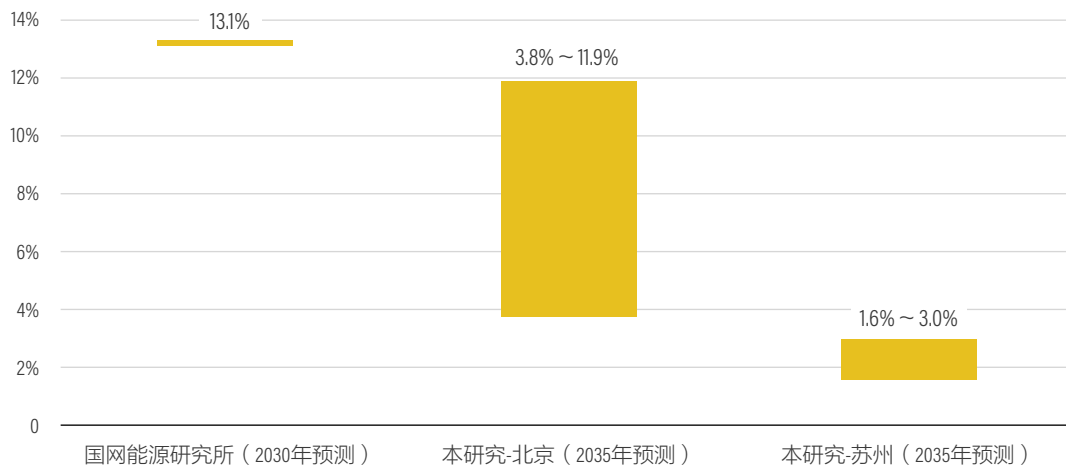


图 36 | 北京市不同类型车辆的充电量热力图

私家车日间充电热力图



私家车夜间充电热力图

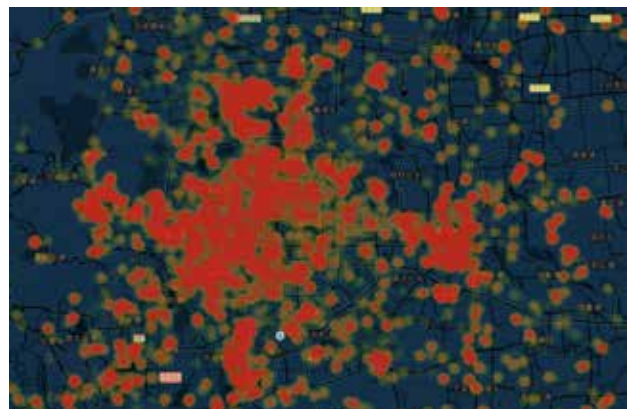




图 36 | 北京市不同类型车辆的充电量热力图（续）

公交车日间充电热力图



公交车夜间充电热力图



出租车日间充电热力图



出租车夜间充电热力图



物流车日间充电热力图



物流车夜间充电热力图



说明：图中红点表明不同类型车辆充电位置的分布以及日间和夜间充电量的差异性。  
数据来源：新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据

将110 kV或35 kV电压降为10 kV，在用户配变电站再降至220V/380V，向用电设备供电。由于所有电压等级中，10kV配电线路最易受到电动汽车规模化推广的影响，因而本文微观层面侧重于讨论10kV的情况。

在10kV配变中，不同微观场景如公交场站、物流场站、住宅小区、办公场所等，受电动汽车充电影响的程度与紧迫性不同（见表8）：

- 公交场站、物流场站需要新增专用配变：公交车与物流车充电需求集中且负荷大。因此，在车队电动化初期，就需要针对公交场站、物流场站新建专属的配变，相应的改造成本不可避免。见第4.3节说明，该微观场景不在本文模型测算范围内。

- 住宅小区、办公场所等场景需要增容现有配变：当前电动汽车推广的初期，私家车充电负荷有限，仍可延用当前的变压器容量；仅在电动汽车充电负荷超过现有容量限值时，有增容需求。

对于有潜在增容需要的住宅小区、办公场所等微观场景，其基础负荷、电动汽车充电规律呈现较大差异，需分场景逐一分析：

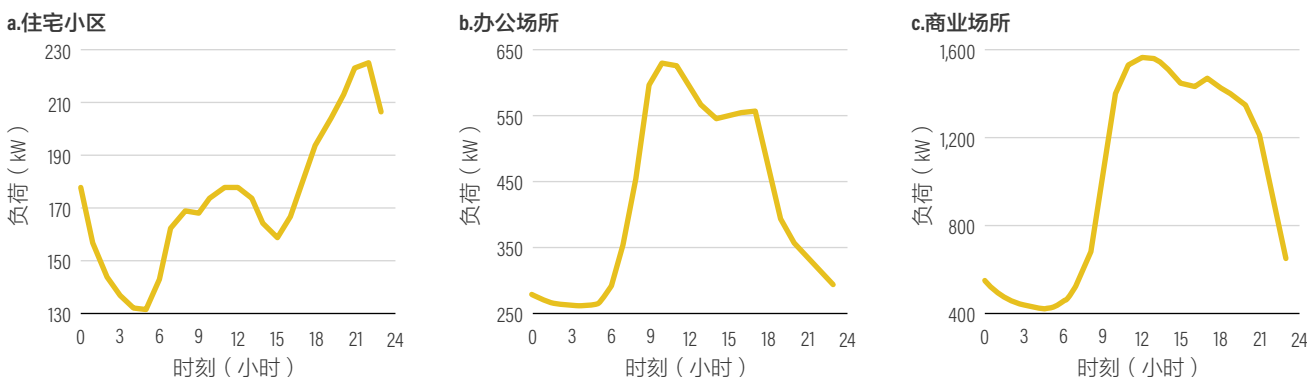
- 基础负荷：住宅小区用电峰值发生于夜间；办公场所和商业场所的用电负荷与全市负荷类似，其峰值集中于日间（见图37）。
- 电动汽车充电规律：住宅小区充电开始时间与住宅基础负荷类似，集中在夜间，在下午18点至

表 8 | 城市微观层面不同场景分类与特点

	公交场站	物流场站	住宅小区	办公场所	商业场所
集中式专用充电站需求	强	中等	弱	弱	弱
充电桩公共开放性	弱	弱	弱	中等	强
充电的随机性	弱	弱	中等	中等	强
充电集中时间	全天	全天	夜间	日间	全天
配电网升级措施	新建专用配变		增容现有配变		

说明：\* 灰色表示该场景不在本研究范围内。

图 37 | 城市不同微观场景：工作日日负荷曲线示意

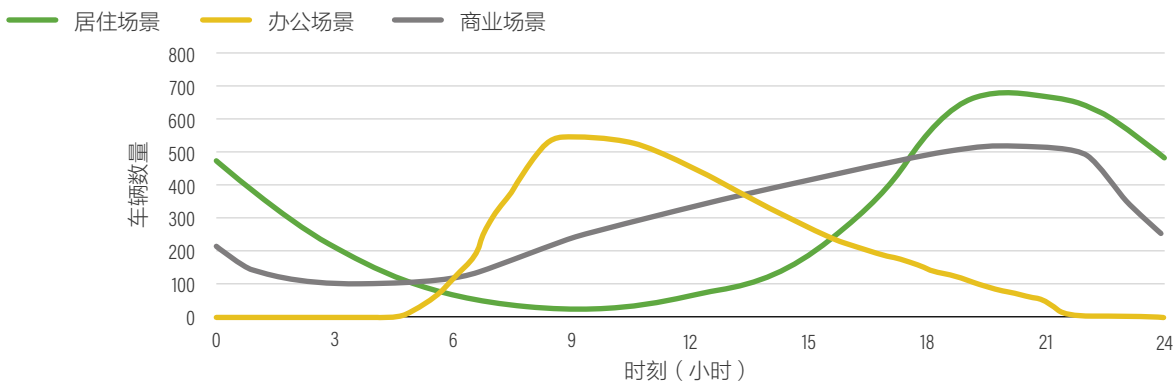


数据来源：中国电力科学研究院

晚上21点半之间的某一时刻达到峰值。相反，办公场所的充电开始时间则集中于日间上午，并在早晨8点至9点半的某一时刻达到峰值。而商业场所公共充电桩的使用时间多集中于日间（见图38）。

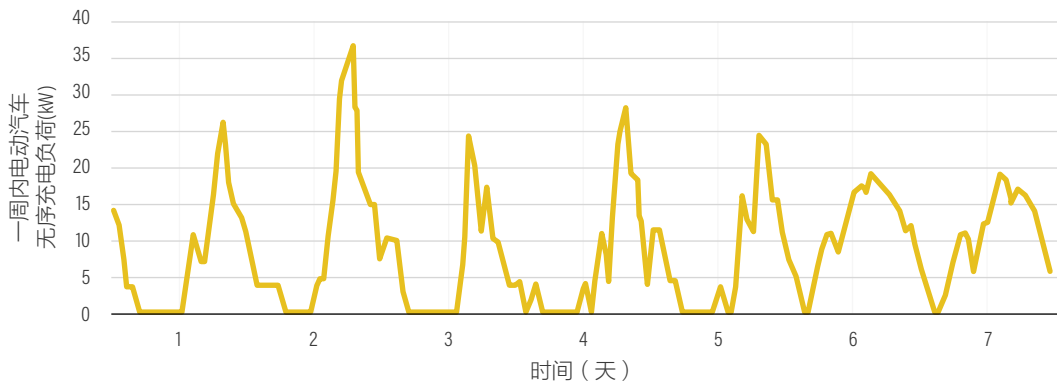
本研究基于第3章中的新能源汽车充电行为大数据分析以及现有文献（Gnann 2018、加州能源局2018），对不同场景下的充电开始时间、充电起始SOC进行概率函数拟合（见图39）。由于在微观层面上，电动汽车充电负荷在随机性上比宏观各类负荷聚合后的结果更高，因此，微观场景中电动汽车的充电开始时间（含充电同时率）不取固定值，而是可以在不同未来场景下灵活调整。

图 38 | 城市不同微观场景：电动汽车充电开始时间示意（单位：辆）



数据来源：根据 Gnann 等（2018）、加利福尼亚州能源局（2018）文献总结，仅作参考。

图 39 | 微观场景充电负荷的随机性以及本研究对微观场景下充电行为的假设



	住宅小区	办公场所	商业场所
充电功率	7kW	7kW 和60kW	60kW
充电起始时间的概率分布	正态分布 · 中值：晚上21点半 · 方差：由充电同时率决定	Gamma分布 · 中值：早晨9点15 · 方差：由充电同时率决定	通过图38中商业中心开始充电时间分布拟合的概率函数
充电起始SOC的概率分布	通过第3.1节私家车日里程分布拟合的概率函数推算	· 7kW慢充：通过第3.1节私家车日里程分布拟合的概率函数推算 · 60kW快充：通过第3.3节中私家车快充起始SOC分布拟合的概率函数推算	通过第3.3节中私家车快充起始SOC分布拟合的概率函数推算
充电终止SOC	100%	100%	100%

数据来源：图中一周电动汽车充电功率来自李志伟 (2016)





## 5.2.1 典型住宅小区的情景分析

选择某老旧住宅小区，小区居民户为1907户，对应10kV的配变额定容量约为4200kW，目前负载率最高为54%，接近全市10kV负载率平均水平。假设小区充电桩充足，且未来每个桩额定充电功率为7kW。同时，假设居民用电的基础负荷不变，未来负荷增长主要取决于电动汽车充电；实际上，随着未来电气化水平的提升，居民小区负荷将不断提升，所以本文微观层面的研究结论可能低估电动汽车对配电网的影响。此外，由于微观场景充电行为具有随机性，本文假设相对极端情景，即居住小区夜间的电动汽车充电负荷峰值与基础负荷（如家用电器）的夜间用电高峰重叠，集中在夜间21点半左右；若实际中电动汽车充电负荷峰值与基础负荷峰值不叠加，总负荷峰值将比本文的模拟值更低。

不同充电行为下的模拟结果显示，尽管住宅场景的充电基本以慢充为主，但随着未来电动汽车户渗透率提高，以及充电行为高度的随机性，该住宅区变压器增容压力不可小觑（见图40和表9）：

- 当电动汽车户渗透率在25%左右且夜间充电同时率高于20%时，该小区夜间最大用电负荷就会接近变压器80%负载率限值。
- 随着电动汽车户渗透率超过50%，小区总用电负荷已在80%负载率限值上下。这意味着需要通过适当的电力增容、电价机制或智能有序充电控制，调整居民充电同时率、充电开始时间，或者鼓励日间在办公等其他公共场所充电。

电动汽车的夜间充电高峰不仅易造成小区配变超载，也加剧该小区用电负荷的峰谷差。例如，当电动汽车户渗透率50%、同时率20%时，该小区用电负荷从目前的1052kW（峰谷差率0.47），倍增至2299kW（峰谷差率0.66）。这意味着，即便小区对配变做扩容，增加的变压器也主要用于夜间20点半至23点短暂的电动汽车充电高峰时段，利用率有限。

值得说明的是，该案例中小区配变负载率不高，属于全市平均水平。实际中，一些城市老旧小区本身就面临重度负载情况（负载率 $\geq 70\%$ ）；在这种情况下，如果电动汽车户均渗透率未达到25%，就有增容需要。

图 40 | 不同充电同时率下住宅小区负荷曲线 (单位: kW)

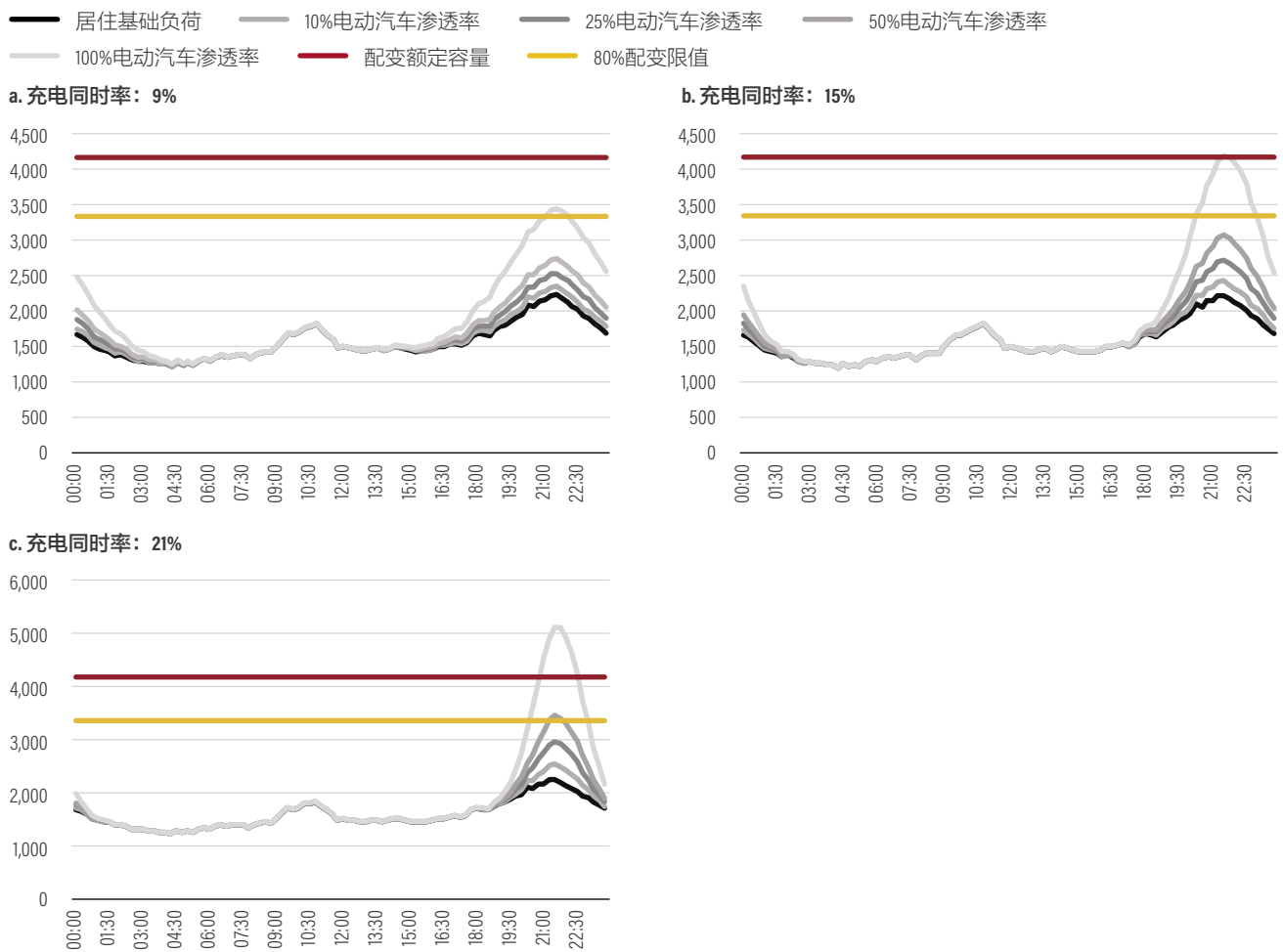


表 9 | 不同电动汽车渗透率、充电同时率下住宅小区配变负荷特征

电动汽车户渗透率	电动汽车数量 (辆)	充电同时率	峰值EV负荷 (kW)	最高总负荷 (kW)	峰值负荷增加比例	EV负荷占高峰电力负荷比例	最大负载率
10%	190	21%	292	2542	13%	11%	61%
		15%	199	2446	9%	8%	58%
		9%	122	2373	5%	5%	56%
25%	476	21%	744	2978	32%	24%	71%
		15%	507	2742	22%	18%	65%
		9%	307	2558	14%	12%	61%
50%	800	21%	1233	3472	54%	35%	83%
		15%	851	3102	38%	27%	74%
		9%	512	2760	23%	18%	66%
100%	1907	21%	2943	5144	129%	56%	122%
		15%	1997	4226	88%	47%	101%
		9%	1243	3476	54%	35%	83%



## 5.2.2 典型办公场所的情景分析

本研究选择相对负载较高的办公场所配变为例，配变额定容量约为4800kW，目前负载率最高达51.6%。该办公场所的停车位共计300个，停车周转率假设为1，即日服务的停车数量为300辆。本文假设该办公场所以60kW充电桩为主且充电桩数量充足。为了模拟负荷上限，办公场景下电动汽车的充电高峰定在上午10点左右，与办公场所自

身用电高峰时间（上午10点至11点）基本重合。

不同充电行为下的模拟结果表明，虽然电动汽车车辆规模小，但由于充电功率更高，因此办公场所与居住小区结果类似：在电动汽车数量占比超过50%、充电同时率高于15%时，本地配变也会达到80%的负载率限值（见图41和表10）。

图 41 | 不同同时率下办公场所负荷曲线（单位：kW）

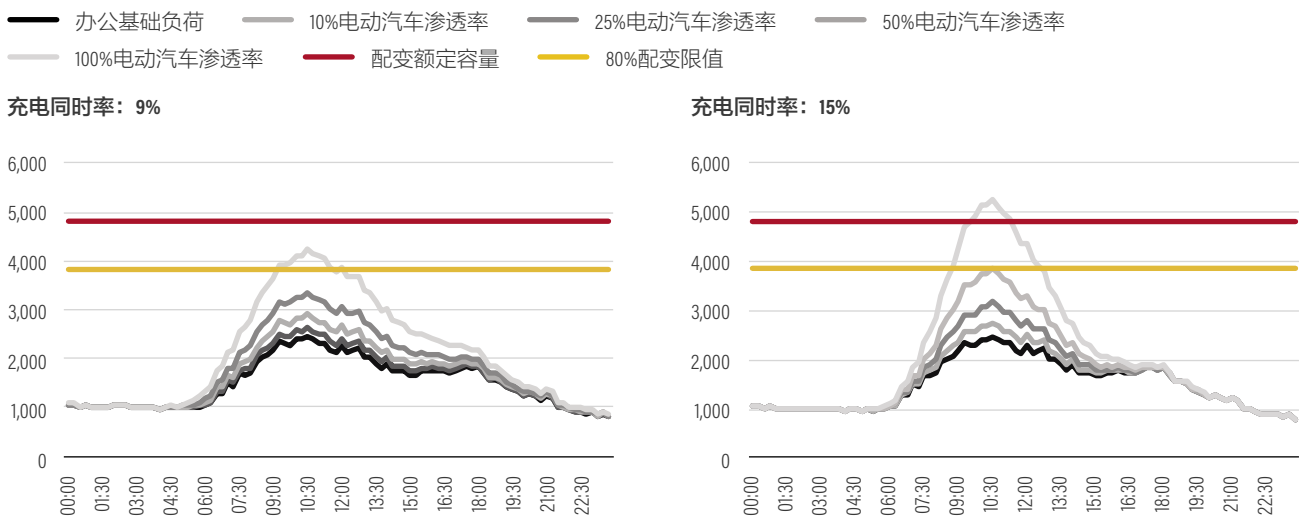


表 10 | 不同电动汽车渗透率、充电同时率下办公场所配变负荷特征

电动汽车户渗透率	电动汽车数量(辆)	充电同时率	峰值EV负荷(kW)	最高总负荷(kW)	峰值负荷增加比例	EV负荷占高峰电力负荷比例	最大负载率
10%	30	15%	284	2764	11%	10%	57%
		9%	180	2660	7%	7%	55%
25%	75	15%	697	3177	28%	22%	66%
		9%	430	2910	17%	15%	60%
50%	150	15%	1382	3861	56%	36%	80%
		9%	885	3353	35%	26%	69%
100%	300	15%	2762	5241	111%	53%	109%
		9%	1761	4240	71%	42%	88%

说明：假设所有停放的电动汽车均有充电需求。

### 5.2.3 典型商业场所的情景分析

一般有停车位的商业场所配变可用容量较大，其最大负载率一般在30%~40%左右。但为分析电动汽车对电网的影响，本研究选择某高负荷商业场所（购物中心）为例，该购物中心的配变额定容量约为7200kW，目前负载率最高为49.7%。

该购物中心地上、地下停车位共计1200个，由于其停车位配比充足，本文假设平均停车周转率为0.85（商业场所一般停车周转率为0.7~2.5），即日到访的车辆数为1050辆。此外，本文假设该购物中心未来将有60kW停车场充电桩，充电桩数量充足。

假设未来该购物中心用电的基础负荷不变，未来负荷增长主要取决于电动汽车充电负荷。模型结果显示，该购物中心电动汽车的充电负荷在下班时间形成峰值，并在19点至20点达到负荷最大值（具体峰值时间，视城市下班时间与本地工商业电价而定）（见图42）。

不同车辆电动化比例下的模拟结果显示，即便在电动汽车渗透率最大的情景——即一天中到该购物中心充电的电动汽车数量达到1000辆左右时，最大用电负荷才略微超过变压器80%负载率限值，配变可开放容量可基本容纳未来电动汽车的充电需求。然而，由于商场场景的充电同时率仅固定在5%，所以不排除随着充电随机性的提高，同时率发生突变，进而给配变带来压力（图42和表11）。

图 42 | 商场场景下负荷曲线（充电同时率：5%，单位：kW）

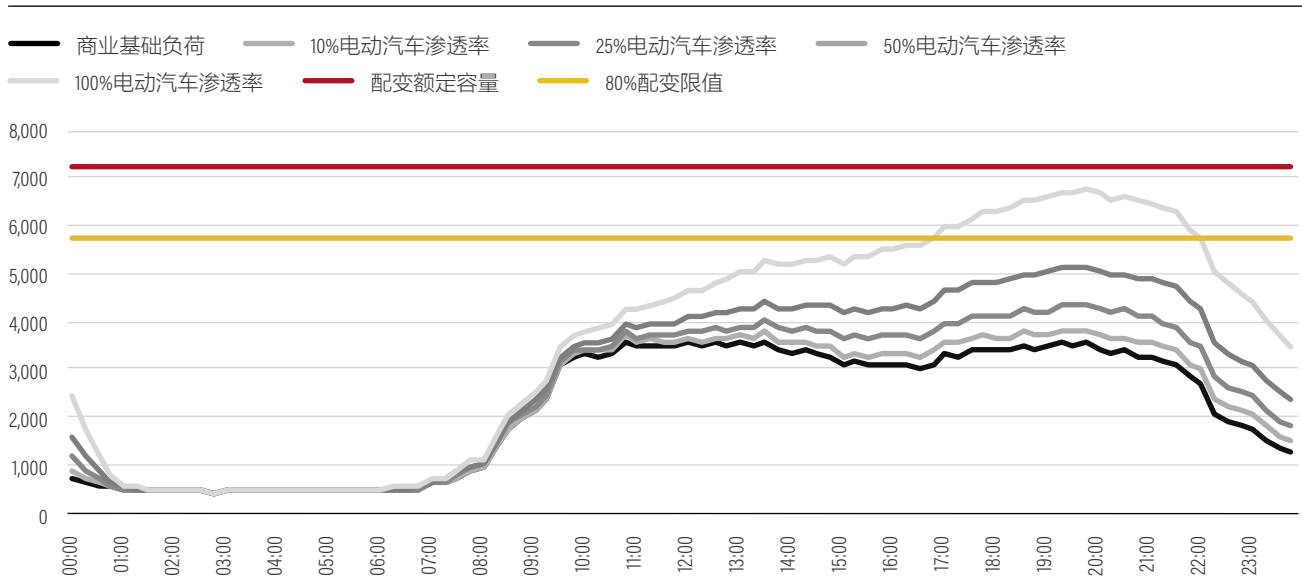


表 11 | 不同电动汽车渗透率、充电同时率下商场配变负荷特征

一天内到访商场的电动汽车数量占比	峰值EV负荷 (kW)	最高总负荷 (kW)	峰值负荷增加比例	EV负荷占高峰电力负荷比例	最大负载率
10%为电动汽车：105辆	287	3813	7%	8%	53%
25%为电动汽车：263辆	855	4354	22%	19%	60%
50%为电动汽车：525辆	1628	5140	44%	32%	71%
100%为电动汽车：1050辆	3235	6741	88%	48%	94%

说明：假设所有到访的电动汽车均有充电需求。

## 5.2.4 总结

由于电动汽车分布的地理不均匀性以及配电网负载上限等因素，新能源汽车对配电网的未来影响较之宏观更大：受到电动汽车充电影响，微观场景的高峰负荷增幅远高于宏观上限的11.9%。部分场景下，当车辆电动化比例达到25%时，本地配变就会重载；当车辆电动化比例达到50%时，多数本地配变将面临超载的风险。

同时，较之宏观影响，电动汽车对微观配电网的显著影响（即增容）在当前就已呈现：目前，一些重载的配变系统和集中式大功率快充站所在的配变已经受到影响；相

对而言，电动汽车宏观影响（如用电量和用电负荷）将在中长期浮现。

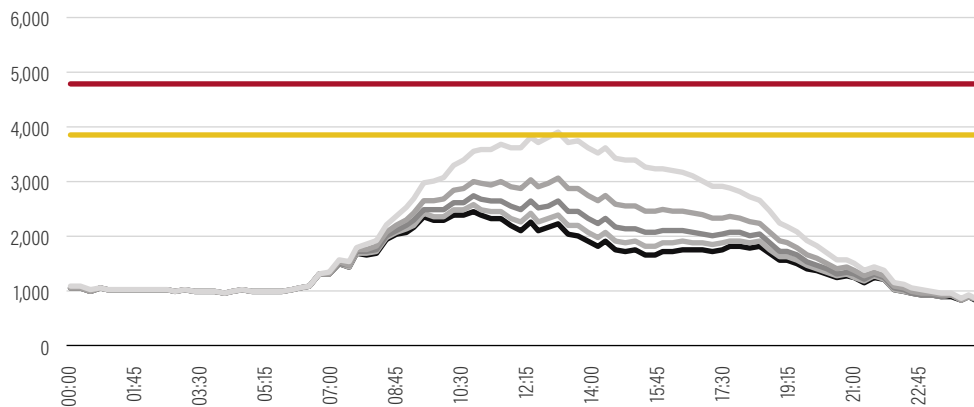
一方面，该影响可归咎于电动汽车数量的增长和公共充电桩功率的提升。如图43所示，在办公场景中，随着充电功率从慢充7kW上升至快充60kW，本地配变的开放容量已不能完全容纳未来电动汽车的充电需求。

另一方面，电动汽车在微观场景中、无序充电条件下的充电负荷也比宏观聚合后的充电负荷的随机性更加明显。特别是随着电动汽车规模增大，充电随机性的微小扰动（如充电同时率或充电开始时间的变化）可能造成本地负荷的剧烈变化，导致配变超容，影响其安全稳

图 43 | 不同充电功率下办公场所负荷曲线（充电同时率：15%）

— 商业基础负荷    — 10%电动汽车渗透率    — 25%电动汽车渗透率    — 50%电动汽车渗透率  
— 100%电动汽车渗透率    — 配变额定容量    — 80%配变限值

### a. 充电功率：7kW



### b. 充电功率：60kW

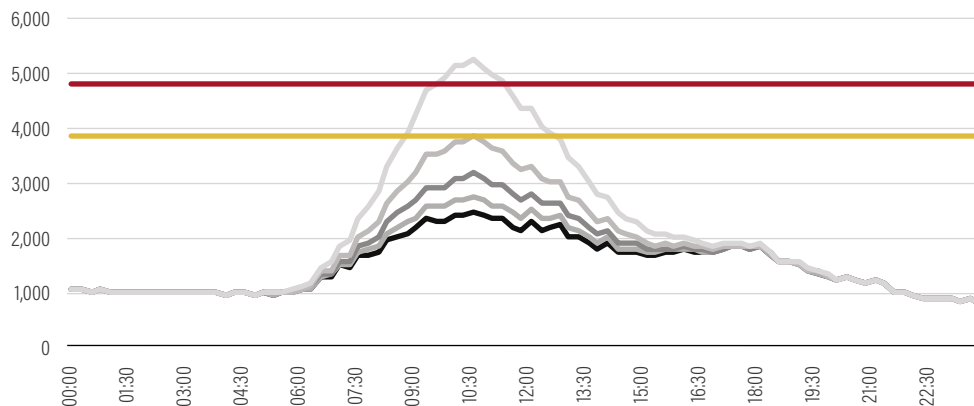
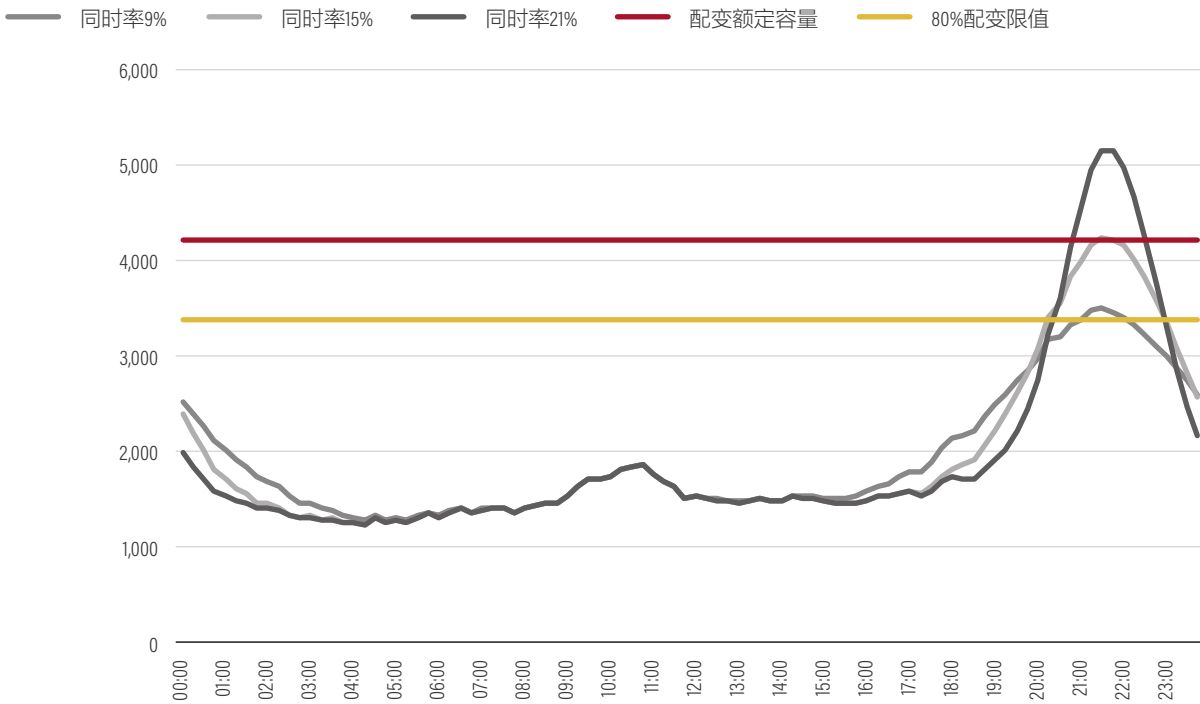


图 44 | 100%电动化水平下，充电随机性导致的用电总负荷变化（单位：kW）



	本地负荷峰值 (kW)	峰谷差 (kW)	配电网扩容量 (kW)
充电同时率9%	3476	2236	116
充电同时率15%	4226	3026	866
充电同时率21%	5144	3945	1784

定运行（见图44）；任由电动汽车无序充电，也使未来规划本地配变的容量需求变得更加困难。

最后，虽然配电网末端的10kV系统最容易受到电动汽车规模化推广、大功率快充以及充电随机性的影响，但除10kV外，部分35kV和110kV配变系统，甚至少数情况下主干网也可能会受到影响。









## 第六章

# 电动汽车与电网协同的潜力分析

与普通的用电负荷不同，电动汽车负荷具有高度可调节性，能够灵活调整充电时间与充电功率。此外，电动汽车也可以作为用户侧储能设施，提供“放电”功能，协助电网削峰填谷。因而，相较于对高昂的电网扩容投资，电动汽车可以发挥这些作用，缓解其无序充电对电网的影响。

电动汽车利用其负荷灵活性与储能放电的功能，能在多个应用场景实现与电网的协同：在宏观层面，电动汽车有序充电或双向充放电，可以缓解对电源装机容量、输电线路容量的投资；在微观层面，也能避免配变过载的问题。然而，针对不同应用场景，电动

汽车与电网协同的优化目标、优化策略也存在差异（见表12）：例如，从电网侧运行安全角度出发，可对全市电动汽车的用电负荷进行优化，也可对某个配变台区的用电负荷进行优化；但受宏观、微观用电负荷曲线的差异性影响，优化结果也不尽相同。

鉴于微观层面配电系统受到电动汽车充电的影响大于宏观的影响，加之微观层面的分析准确度可控（即限定微观场景后，电动汽车在具体场景的可调度时间和可调度电量已知），因此本节侧重分析微观层面不同协同措施（有序充电、双向充电）对减少电动汽车对配电网冲击发挥的作用。

表 12 | 电动汽车和电网协同的优化目标设定

	电网侧优化目标： 运行安全优先 <sup>4</sup>	用户侧优化目标： 经济效益优先
<b>宏观层面：</b> 全局负荷削峰填谷	基于电力系统负荷曲线的控制策略： <ul style="list-style-type: none"><li>· 最小化电力系统负荷峰谷差</li><li>· 最小化电力系统负荷峰值</li></ul>	· 最小化用户电费（包括工商业、大工业的需要电费）支出
<b>微观层面：</b> 局部配网负荷削峰填谷	基于配变台区负荷曲线的充电控制： <ul style="list-style-type: none"><li>· 最小化局部配网负荷峰谷差</li><li>· 最小化局部配网负荷峰值</li></ul>	

表 13 | 不同微观场景下的充电可调节性

	公交场站	物流场站	住宅小区	办公场所	商业场所
电动汽车充电可调节性	弱	弱	强	强	弱

说明：表中营运车辆如公交车、城市货车的充电灵活性未考虑备用车辆；对于有备用车辆的营运车队，将具备很高的充放电灵活性。

在不同微观场景中，电动汽车充放电的可调节性有所差异：私家车在住宅小区和办公场所的停车时间长、充电灵活性高，因此存在电动汽车与电网协同的基础。相较之下，公共充电桩的充电需求具有刚性（见表13），因此，除换电模式及共享（租赁）汽车服务外，公共场所（如公共快充站）车网协同的潜力仍有待探讨。为简化分析，本文仅以第5.2.1节的住宅小区为例，定量分析有序充电、双向充放电对本地负荷削峰填谷的潜力。

## 6.1 有序充电的潜力分析

激励用户参与有序充电的措施通常包括用户对峰谷电价的自发响应、由配电网变压器或充电运营商远程智能控制的有序充电：

- 用户对峰谷电价自发响应：电动汽车车主通过手机APP人为设定开始充电时间（即延迟充电），并远程终止充电或设置充电量；设定的充电时间一般以峰谷电价为激励机制，以谷时为充电开始时间。
- 配变台区的智能控制：根据住宅小区配变台区的负荷状态以及与车辆出行需求，自动优化充电的时序与功率，以降低本地增容压力，提高设备利用效率。该种方式也可结合峰谷电价，激励小区更多用户参与。

为定量分析两种有序充电策略的削峰填谷效果，这里采用第5.2.1节中住宅小区100%电动化的微观情景——即本地配变负载最大的情景。其中，自发响应峰谷电价的有序充电（谷时开始时间设置为凌晨0点），通过调整电动汽车充电开始时间的中值实现，即部分电动汽车的充电开始时间以凌晨00点点谷时为中值，做正态分布（见专栏五）。而智能有序充电优化则采用线性规划，

以本地负荷峰谷差最小化为目标函数。

模型结果表明，两种有序充电措施均能有效降低本地负荷峰值，二者区别在于缓解配变增容压力程度的不同（见图45）：

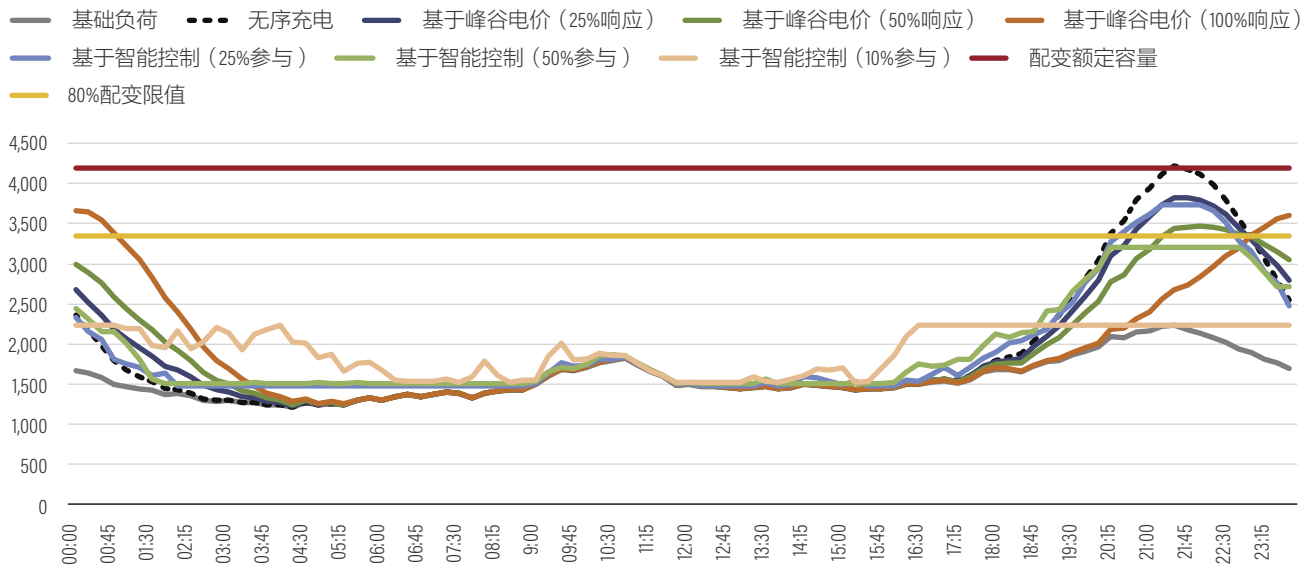
首先，单纯依赖峰谷电价的方式存在瓶颈：尽管25%、50%和100%的电动汽车充电需求分别被转移到凌晨谷时（剩余数量的电动汽车仍保持无序充电），但住宅小区配变的用电高峰仍然徘徊于80%负载率限值左右。因而，在峰谷电价机制下，该住宅小区仍然有配变增容的需要，此外，值得注意的是，随着响应峰谷电价的电动汽车车主群体扩大，会产生负荷的反弹。例如，当住宅小区所有电动汽车车主将充电延迟到凌晨开始时，大规模车辆都定时在谷时集中开始充电，反而形成了另一个用电的峰值，导致小区用电高峰不降反升。

其次，较之峰谷电价，智能有序充电削峰填谷的效果更理想：随着参与智能控制的有序充电的用户群体增加，用电峰值、峰谷差均不断缩小。当50%小区电动汽车用户参与智能有序充电后，已无配变增容的必要。当所有电动汽车用户参与有序充电时，本地负荷峰谷差较无序充电下降2274kW，降幅达75%。

以上结论并不否定峰谷电价的必要性，鼓励电动汽车车主参与智能有序充电需要峰谷电价之类的经济激励机制。然而，峰谷电价只有结合智能控制，才能实现最理想的削峰填谷效果。

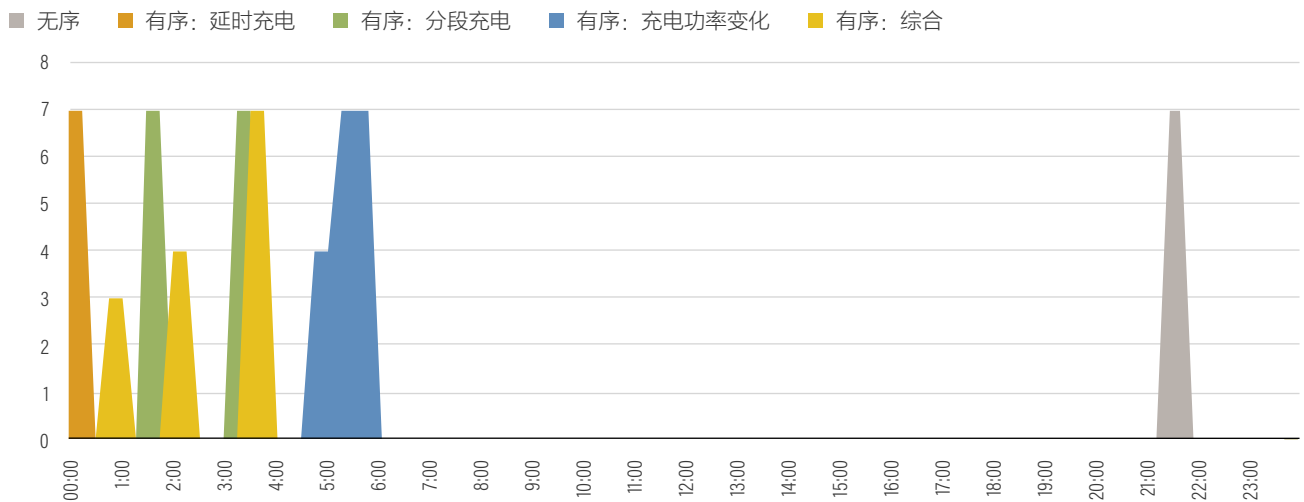
从单车充电负荷曲线上也可见一斑：峰谷差价只能起到“延时充电”的作用，而智能控制的有序充电下，控制策略包括分段充电、充电功率变化等多种选择，更灵活（见图46），因此削峰填谷的效果也更为理想。

图 45 | 居住小区优化后负荷：不同有序充电措施的削峰填谷效果（电动化比例100%，单位：kW）



	电动汽车车主参与度	最高负荷 (kW)	负荷峰谷差 (kW)	配变最大负载率	配电网扩容减少量 (kW)
无序充电	0%	4225	3026	101%	--
	25%	3842	2627	91%	383
	50%	3480	2250	83%	746
	100%	3677	2440	88%	549
有序充电：智能控制	25%	3752	2290	89%	474
	50%	3225	1734	77%	866
	100%	2251	752	54%	866

图 46 | 单车参与有序充电的不同负荷曲线（单位：kW）



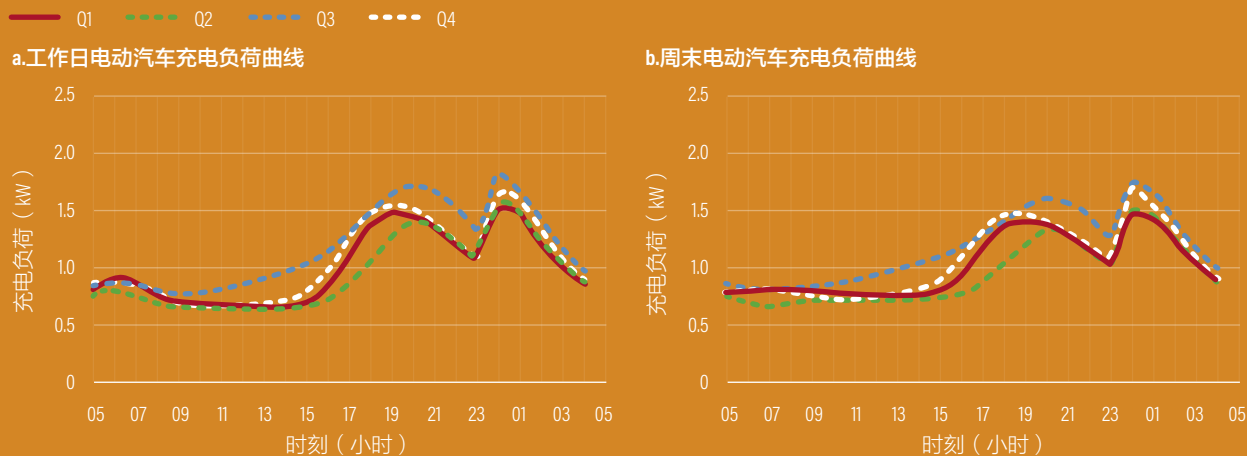


## 专栏 5 | 现实中电动汽车用户对峰谷电价响应的特征

随着居民峰谷电价以及遥控车辆充电开始时间的手机APP的普及，国内外的私家电动汽车已呈现出有序充电的迹象。然而，实际中，电动汽车车主对峰谷电价响应程度（是否会改变充电行为）以及响应方式（充电行为如何变化），都影响峰谷电价削峰填谷的效果。例如，针对美国圣地亚哥市和中国上海市的私家车充电开始时间、充电负荷曲线的分析表明：电动汽车车主会根据峰谷电价调整充电开始时间，特别是将充电延迟到谷时电价开始时刻；但车辆充电开始经常集中设置在谷时的开始时刻，容易形成深夜充电负荷的高峰：

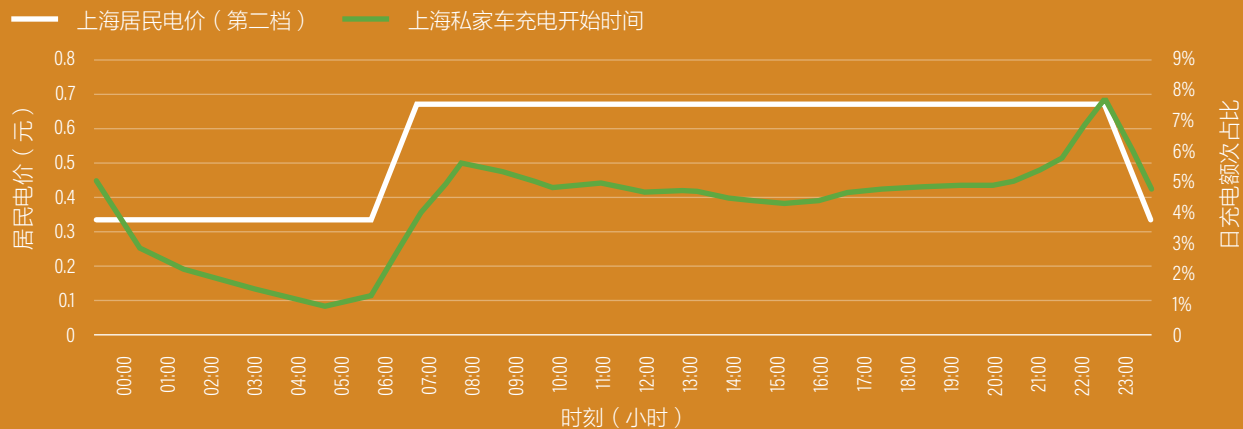
- 美国圣地亚哥市居民夜间充电具有“双负荷峰”特征：电价弹性低的高收入用户仍集中于夜间用电负荷高峰时段（下午6点至晚上8点左右）充电；电价弹性高的用户则在峰谷电价的激励下转移到深夜的“超级谷时”（0点之后）充电，且新的充电高峰爬升得更陡峭（Kim 2019，见专栏图8）。
- 中国上海市居民夜间充电“深夜峰值”特征：上海市私家车充电开始时间明显集中于夜间22点左右，即谷时开始时刻（见专栏图9）。

### 专栏图 8 | 美国圣地亚哥市不同季节24小时电动汽车充电负荷曲线



说明：Q1为1~3月，Q2为4~6月，Q3为7~9月，Q4为10~12月

### 专栏图 9 | 上海市电动私家车用户开始充电时间分布及居民峰谷电价对比



数据来源：私家车充电开始分布来自新能源汽车国家监测与管理中心 2018 年统计数据

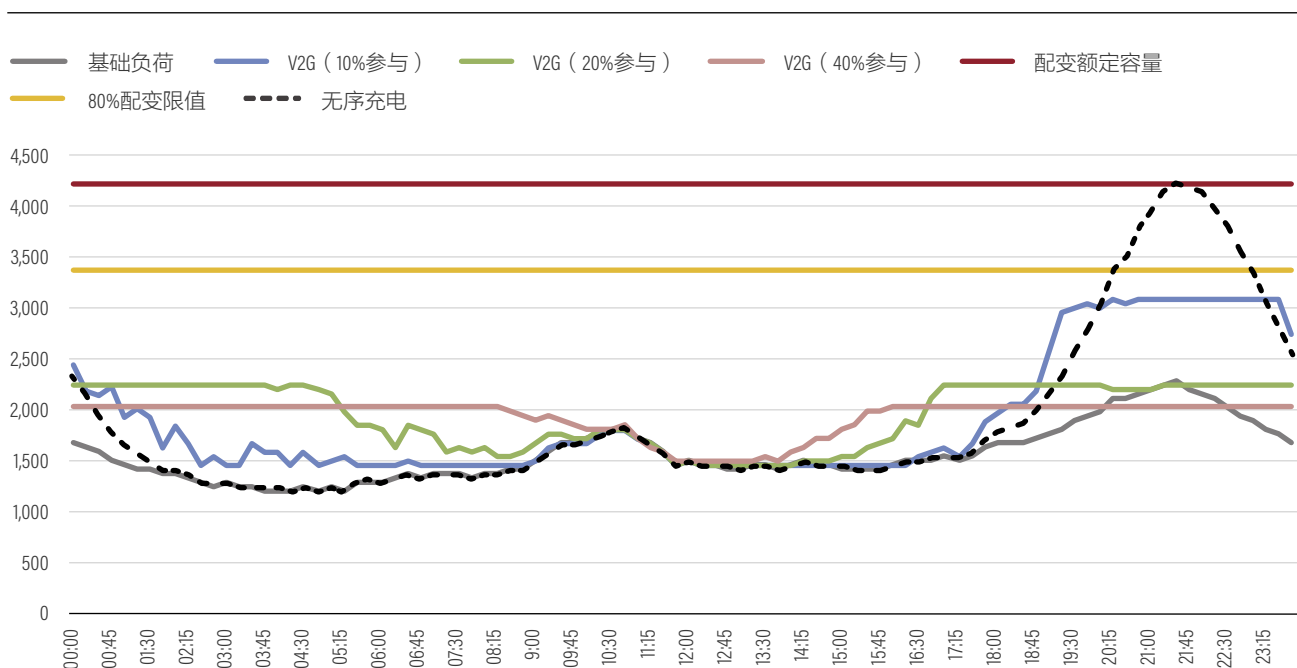
## 6.2 双向充放电的潜力分析

由于电动汽车能够更灵活地在本地负荷峰值时放电，在负荷谷时充电，所以双向充放电能够通过调动更少数量的电动汽车车辆，实现比有序充电更理想的“削峰填谷”效果。本节在第5.2.1节中住宅小区100%电动化的微观情景下，利用线性规划，通过调节参与充放电的电动汽车数量（剩余的电动汽车仍保持无序充电），以本地负荷进行峰谷差最小化为目标函数，进行优化。模型假设车辆每一刻

SOC状态不低于30%，单车充放电功率均设置在3~7kW之间。模型结果显示（见图47）：

- 10%的住宅小区电动汽车参与双向充放电时，其削峰填谷效果与50%的电动汽车参与有序充电的效果相当，且本地配变无须增容。
- 20%的住宅小区电动汽车参与双向充放电时，其削峰填谷的效果与100%的电动车参与有序充电的效果相当。

图 47 | 居住小区优化后负荷：不同双向充放电（V2G）参与程度下的削峰填谷效果（电动化比例100%，单位：kW）



	电动汽车车主参与度	最高负荷 (kW)	负荷峰谷差 (kW)	配变最大负载率	配电网扩容减少量 (kW)
无序充电	0%	4225	3026	101%	--
	25%	3752	2290	89%	474
有序充电：智能控制	50%	3225	1734	77%	866
	100%	2251	752	54%	866
双向充放电	10%	3093	1642	74%	866
	20%	2225	749	53%	866
	40%	2033	543	48%	866

说明：不同情景下，单车充放电功率均设置在7kW之内，调整参与充放电车辆数。例如，10%参与说明场景中10%的电动汽车参与放电。

图 48 | 单车参与双向充放电的不同负荷曲线（单位：kW）

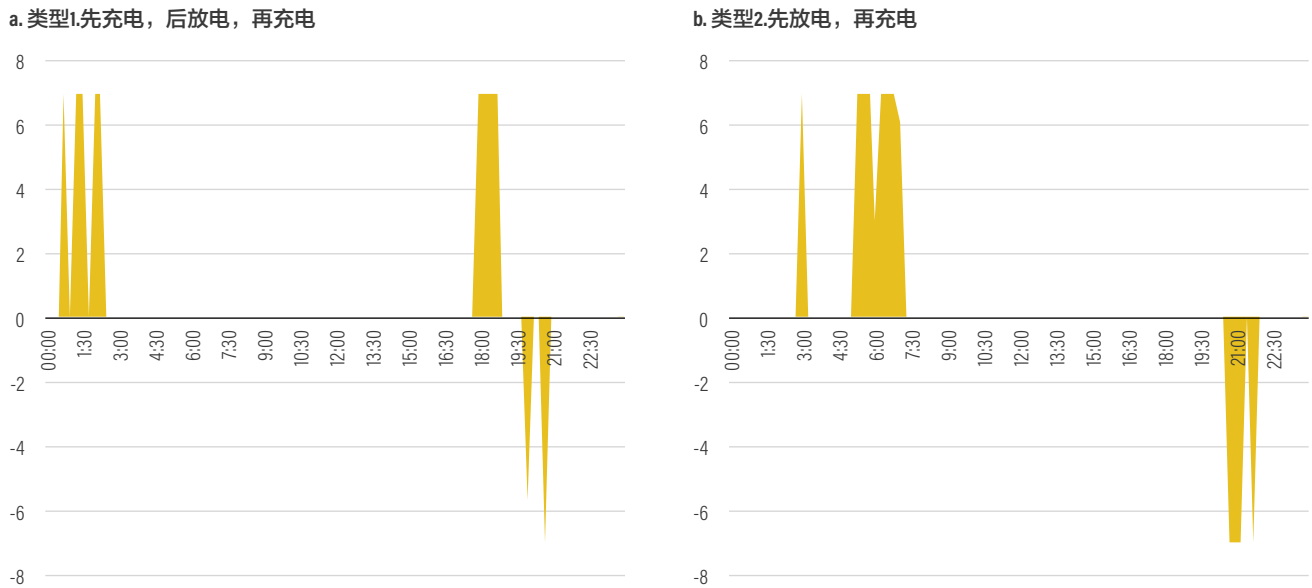
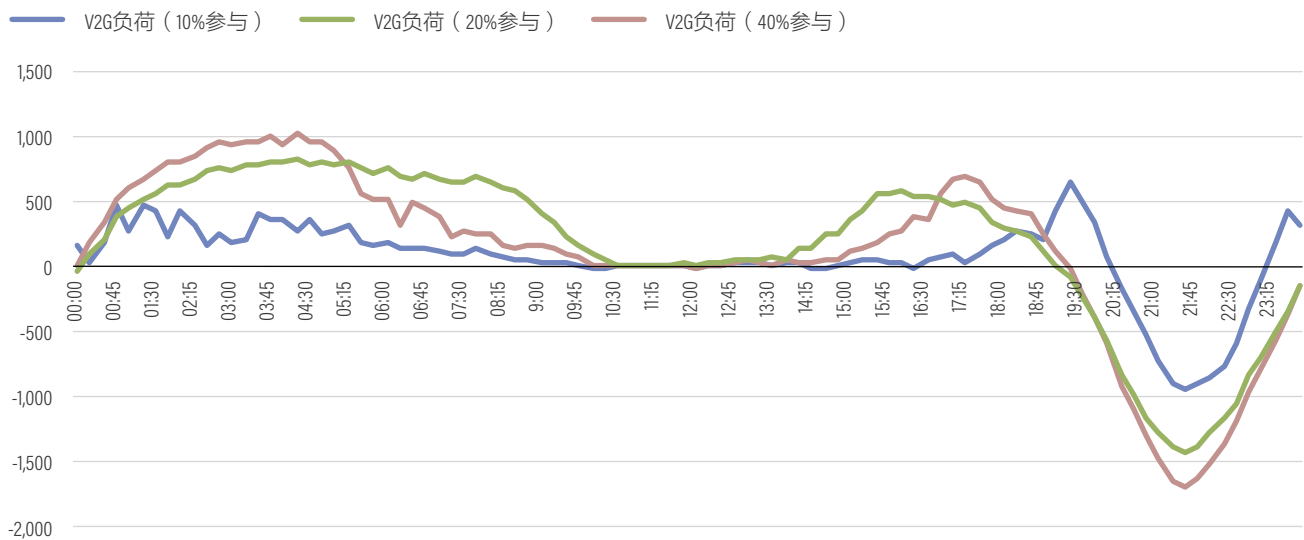


图 49 | 参与双向充放电所有车辆的V2G负荷曲线（单位：kW）



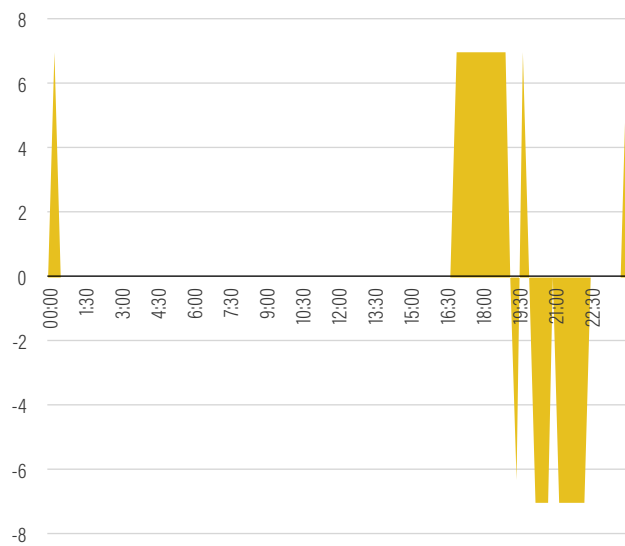
说明：不同情景下，单车充放电功率均设置在7kW之内，调整参与充放电车辆数。例如，10%参与说明场景中10%的电动汽车参与放电。

虽然双向充放电只需要调动少量电动汽车就能实现理想的本地负荷削峰填谷效果（见图48中不同单车充放电负荷控制曲线），但随着参与V2G的车辆数增加，每辆车所贡献的放电电量（即放电深度）将逐渐减少（见图49和图50），这也更满足部分车辆临时性出行的刚需，缓解频繁充放电对动力电池衰减的影响。

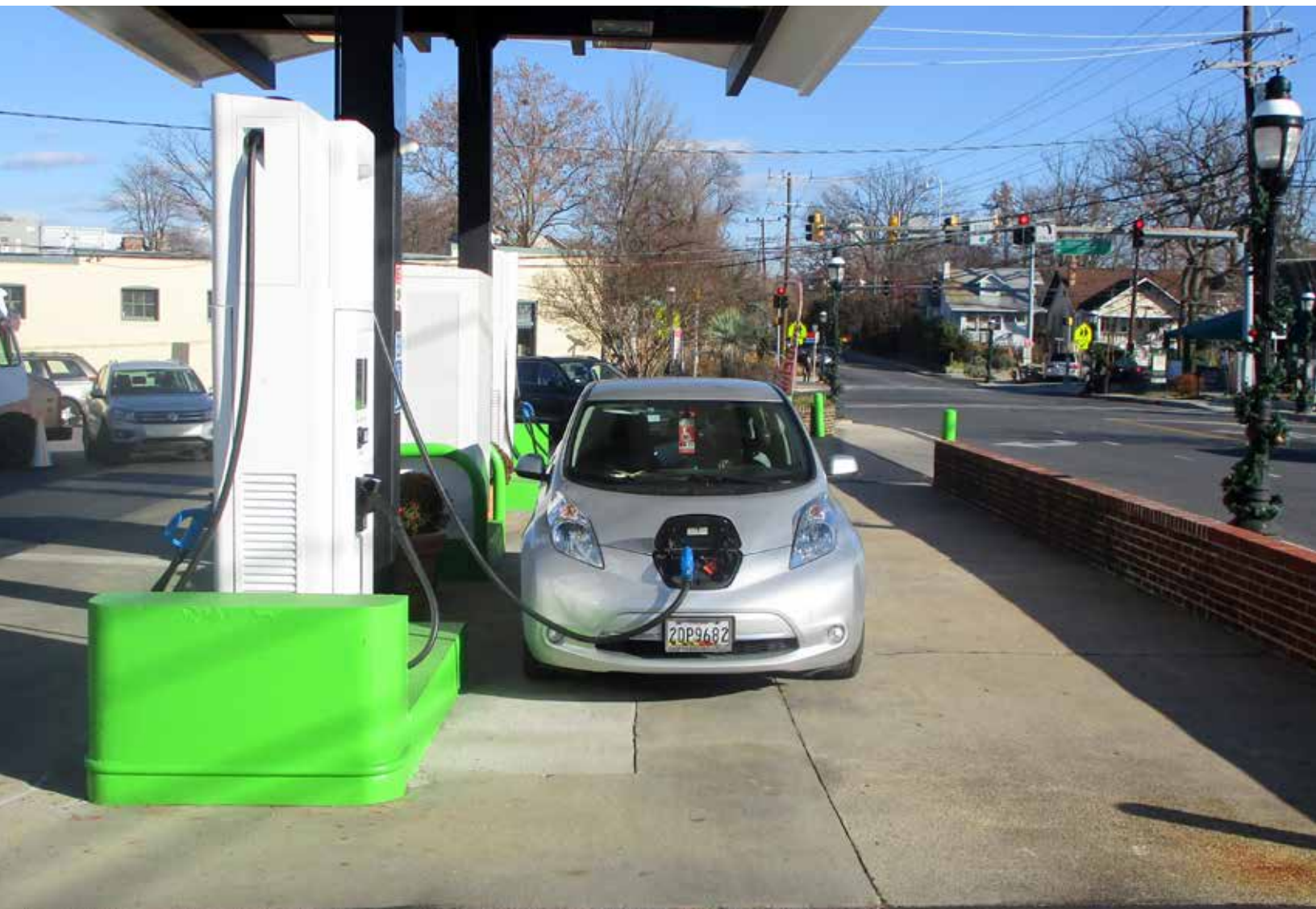
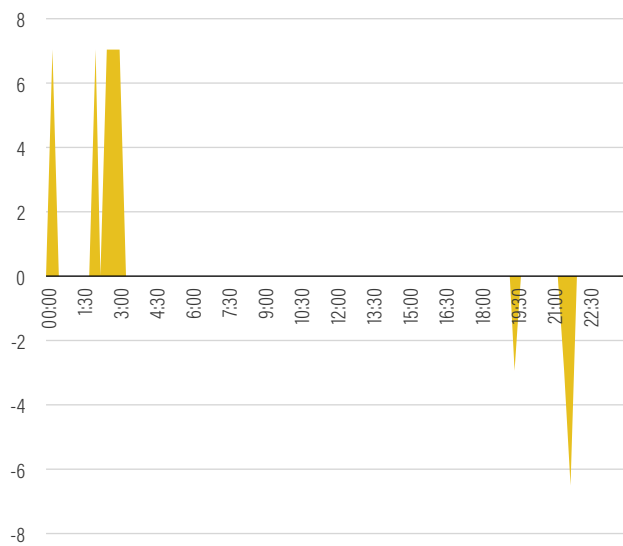
以上分析对其他场景同样适用。例如对于城市电动物流车等，可以调动营运车队中少量备用电动汽车或使用强度小的车辆，通过智能控制的双向充放电，实现延缓局部配变增容并减少需量电费支出的作用。

图 50 | 不同电动汽车参与度下，单车双向充放电负荷曲线比较（单位：kW）

a. 20%电动汽车参与V2G



b. 40%电动汽车参与V2G







ChargeNetnz

Electric Vehicle Rapid Charger

PAK n SAVE

ChargeNetnz

ev

ELECTRIC  
VEHICLE  
PARKING  
ONLY

ELECTRIC  
VEHICLE  
PARKING  
ONLY

EV

## 第七章

# 结论与建议

综合以上分析可得，未来，电动汽车大规模推广后，其无序充电问题将给发电侧、输电侧、配电侧与供电侧均带来挑战。

在宏观层面，受新能源汽车未来推广规模以及私家车快充占比和充电同时率的影响，电动汽车对全网的用电负荷可能造成的影响存在明显分化：

- 当城市新能源汽车保有量增长速度维持现有水平（2035年新能源汽车保有量在300万辆以内，2050年在450万辆以内），且慢充占比相对较高时：2035年和2050年城市电网峰值负荷的增幅均在1%~5%之间，最大负荷需求均在500~1100MW之间；该增幅在部分城市可以被电源侧富余的装机容量消化。
- 当城市新能源汽车保有量增长加速（2035年新能源汽车保有量超过300万辆，2050年超过450万辆），且快充占比相对较高时，2035年和2050年城市电网峰值负荷的增幅均在10%~11%左右，最大负荷需求在1000~4000MW之间；该增幅在极端情况下可能使部分地区的电源装机容量、输电线路容量出现缺口。此外，快充的普及不仅将增加电网负荷，也增加电动汽车负荷的复杂性与不确定性（即快充充电时间、充电同时率的不确定性）。

鉴于不同中国城市在电动化路径与充电模式（快充、慢充）的选择上存在差异，电动汽车对电网宏观影响在不同城市呈现不同结果：从无显著影

响，到对电源、输电线路的容量均产生较大的影响。各城市需要结合自身特点，采取差异化的措施。此外，鉴于大功率快充对电网宏观和微观层面的负面影响均较大，可能导致电网高昂的连带投资，其推广规模需谨慎研究。

在微观层面，局部配电系统受到的影响在幅度上大于全网的影响，在时间上也更接近当下：在局部配电网中，受电动汽车充电影响，微观场景局部负荷峰值的增幅从5%至129%不等；特别是当车辆电动化比例达到50%时，多数配变都面临超载风险。除了公交车、物流车等需要专用配变的场景外，可能受到电动汽车无序充电影响、优先需要考虑增容的配网系统还包括住宅小区、安装快充公共桩的场所，以及本身变压器中载或重载的配变。

单纯增容配变未必能满足电动汽车无序充电的需求。随着电动汽车规模增大，充电随机性（即充电同时率）的微小扰动会造成本地充电需求与负荷峰值发生剧烈变化。因此，任由电动汽车进行无序充电而不采取任何需求侧管理措施，可能让规划未来配变容量变得更加困难。另外，无止境地增加配变容量也会增加全社会投入，而由于无序充电加剧的本地负荷峰谷差也让存量电力资产无法得到高效利用。在一些老旧住宅小区，配电网增容更面临着用地空间的约束。因此，有必要通过电动汽车的有序充电或者双向充放电等措施，让电动汽车更加友好地接入电网。

在各类协同措施中，双向充放电能够通过调动少量的电动汽车，实现比有序充电更理想的“削峰



填谷”效果。本研究显示，在研究设定情景下，10%电动汽车参与双向充放电时，其削峰填谷效果与50%的电动汽车参与有序充电的效果相当。此外，由于采用双向充放电能更充分地利用本地配变的开放容量，本地配变基本无增容需要。

对于有序充电措施而言，虽然多种措施可实现有序充电，但效果各异。单纯的峰谷电价机制虽然在初期可在一定程度上转移与减少充电负荷峰值，但随着响应峰谷电价的电动汽车车主群体扩大，可能会产生负荷的反弹。而智能控制有序充电结合经济激励机制——即峰谷电价，削峰填谷的效果更理想：随着参与智能控制的有序充电的用户群体增加，用电峰值、峰谷差均不断缩小。

以上分析仅局限于对电网侧效益的分析，没有考虑不同协同措施的经济性、技术阻碍和公众接受度（见表14）。在实际中，基于智能控制的有序充电和双向充放电面临的商业模式、技术阻碍及有限的公众接受度，可能影响其实施与推广；感兴趣的读者可参见本系列第二篇——《中国电动汽车和电网协同路线图研究》，这篇文章对不同措施的具体实施操作进行了探讨。

随着电动汽车数量不断增加，城市发展与改革部门应会同电网企业及早采取措施，化解电动汽车对本地配电网的冲击，同时为电动汽车推广扫清障碍。相关建议如下：

一是推进对现有配网设施的改造：

- 无论对10kV还是35kV和110kV配电网，应由本地发展和改革部门协同电网企业，在新能源汽车推广的不同阶段，定期组织电力部门对既有变压器进行容量筛查，识别近期、中期、远期有改造需求的配变系统。
- 优先推进电动汽车与电网协同措施，延缓对配电网增容：考虑到成本和用地局限，配变增容不是最经济、有效的措施，应优先考虑布局电动汽车与电网协同措施。在相关技术尚未商业化和用户接受度有限的近期，可通过峰谷电价机制实现削峰填谷；并尽早克服智能有序充电在商业模式、技术上的阻碍，为规模化推广奠定基础。在中长期，在住宅小区等配变易受影响的地区推广智能有序充电，并以营运车队（如城市物流货车、企事业单位用车、出租租赁用车等）为试点，逐步

表 14 | 不同电动汽车与电网协同措施的比较

	双向充放电	有序充电	
		智能有序充电	峰谷电价
削峰填谷效果	★★★★★ (调动少量电动汽车就能延缓增容需求)	★★★★★ (随着参与群体扩大，能缓解增容需求)	★★★ (随着响应群体扩大，会有负荷反弹，且仍有增容需求)
实施容易程度与用户接受度	★★ (车—桩—网软硬件改造、用户接受度有限)	★★★ (需要经济激励机制，及车—桩—网软硬件改造)	★★★★★ (无须任何软硬件改造)

推广双向充放电，更深入缓解配网增容需要。值得注意的是，所有协同措施的重要前提为“电网对私人、公共充电桩的直接供电”，因此有必要在受影响的配变系统中，对充电桩进行报装和单独计量的改造。对于以上措施都难以实现的配变系统，可考虑采用增容作为权宜之计。

- 无论对配电网进行智能化改造还是增容，都需要不同程度的成本投入。该成本目前主要由电网企业承担。然而，随着未来电动汽车和电网协同措施的推广，应制定改造成本和用户侧收益的合理分摊机制，形成可持续的商业模式，更好地激励企业、用户等多元主体积极参与。

二是对新建区域提前布局智能配网设施：

- 提前布局智能配网设施：随着电动汽车等新负荷或用户侧储能设施的接入，配网的规划设计应从目前“被动适应”转为“主动适应”。同时，配电网的设计与建设要求，也应超越传统的以“安全可靠”为主的目标，纳入“自动化”和“智能化”的新要求。因此，新建城市地区的配电网

应要求配备到户（到桩）的智能计量系统、台区智慧控制终端等，更好地支撑用户与电网、电网与充电桩的信息互动，鼓励用户通过各种方式参与电网削峰填谷，实现与电网的协调互动。

- 修改配电容量标准：结合未来住宅小区、办公场所和商业场所的用电量需求增加，也可适当考虑提高配电容量标准。目前部分城市配电设施建设标准对住宅小区的户均用电容量配置要求不高，例如，山东和北京对建筑面积小于100平方米的户用电容量要求仅为6kW（见表15），不足以满足车辆慢充的功率容量要求（3.5kW或7kW）。未来以每两户共享1个充电桩计算（中国电动汽车百人会 2019），可适当提高新建住宅小区的户均用电容量或公共区域的用电容量要求，要求统一将供电线路敷设至停车位，并预留电表箱和充电设施安装位置，以更好支持“直供电”。

此外，对集中式大功率公共充电站如公共停车场、公交场站，在中长期也需结合电动汽车用户的充电需求，合理规划专用的配电设施。

表 15 | 北京和山东城市住宅小区配电标准

山东		北京	
单户建筑面积 (m <sup>2</sup> )	容量配置 (kW)	单户建筑面积 (m <sup>2</sup> )	容量配置 (kW)
<90	6	<100	6
90 ~ 120	8	90 ~ 120	8
120 ~ 150	10	120 ~ 150	8 ~ 12
>150	12	>150	12 ~ 24

数据来源：2017年北京住宅小区配电标准及技术原则

山东省工程建设标准《住宅小区供配电设施建设标准》的通知（鲁建标字 2016 号）



## 参考文献

1. 国网能源研究院有限公司. 2018. 电动汽车发展对配电网影响及效益分析. 自然资源保护协会项目报告
2. 国家发展和改革委员会能源研究所、国家可再生能源中心、清华大学 2017 新能源发电与电动汽车协同发展战略研究. 能源基金会支持项目报告
3. 王军亮、李永、李建设、陈麒宇 2018. 电动汽车充电对电网安全风险影响及管控措施研究. 发电技术39(5): 405-411
4. 中国汽车技术研究中心北京工作部 2016. 私人用户居住地及工作场所充电基础设施支持政策研究. 能源基金会资助的项目报告
5. 中国电力企业联合会 2018. 2017—2018年度全国电力供需形势分析预测报告
6. 中国电力企业联合会 2019. 2018—2019年度全国电力供需形势分析预测报告
7. 高德地图 2017. 2017 上半年中国高速公路出行大数据报告
8. 李志伟. 2016. 配电网中分布式发电与电动汽车随机协同调度研究. 华北电力大学硕士论文
9. Agora Verkehrswende 2019. Distribution grid planning for a successful energy transition—focus on electromobility. Conclusions of a study commissioned by Agora Verkehrswende, Agora Energiewende, and Regulatory Assistance Project (RAP).
10. Ali, M., Tongia, R. 2018. Electrifying mobility in India: future prospects for the electric and EV ecosystem. Brookings India IMPACT Series No. 052018.
11. California Energy Commission. 2018. California PEV Infrastructure Projections 2017-2025. Staff report of California Energy Commission. <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70893.pdf>
12. Gnann T., Klingler A., Kuhnback M., 2018. The load shift potential of plug-in electric vehicles with different amounts of charging infrastructure. Journal of Power Sources. 390: 20-29.
13. Kim J.D. 2019. Insights into residential EV charging behaviour using energy meter data. Energy policy 129:610-618.
14. McKinsey & Company. 2018. The potential impact of electric vehicles on global energy systems. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-potential-impact-of-electric-vehicles-on-global-energy-systems#>
15. 中国电动汽车百人会 2018 公共领域充电基础设施发展报告 (2019) 课题报告
16. 华创证券 2018. 电力辅助服务及储能市场兴起, 助力电网新能源消纳. 电网新能源消纳系列报告之三
17. 中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心 2019 中国传统与新能源汽车发展趋势2050研究. 能源基金会资助的项目报告

## 注释

1. 中国新能源汽车2050年年用电量预测由车辆规模、电动汽车年行驶里程（13000千米）和百千米电耗经过计算后得出。
2. 广义上，电动汽车与电网协同可通过电动汽车自身参与有序充电、双向充放电，或者退役电池或换电站作储能电站等方式实现。电动汽车换电站和退役电池作储能电站的方式在运营管理、体制机制上，与目前固定储能设施一致，不受电动汽车出行约束，且政策阻碍不大、技术成熟，因此这一协同方式不在本文的讨论范畴内。
3. 根据北京市交通委员会2017年发布的《北京市停车资源普查报告》，北京市全市城镇地区居住停车位缺口总量达到129万个，且停车位供需矛盾主要集中在居住区域，夜间停车位供需矛盾突出。
4. 电动汽车与电网协同除了实现削峰填谷外，也可以作为调频、调峰资源。后者本文将不涉及。

## 致谢

在本报告的研究与编写过程中，能源和交通领域的众多专家、学者给予了大力支持并提供了宝贵建议，在此，我们向各位专家表示由衷的感谢。

同时，世界资源研究所的各位领导和同事也给予了大力支持和指导。在此特别向世界资源研究所（美国）北京代表处首席代表方莉、副首席代表房伟权、S&R负责人李来，以及其他各位同事表示诚挚的谢意。

最后，我们要感谢橡树基金会（Oak Foundation）和UPS基金会对本研究提供的资金支持。对本报告做出重要贡献的专家和同事名单如下（评审和咨询专家）：

<b>刘坚</b>	国家发展和改革委员会能源研究所
<b>周锋</b>	全球能源互联网发展合作组织
<b>王明才</b>	国网电动汽车服务有限公司
<b>唐渊</b>	中国南方电网广州供电局
<b>张永伟</b>	中国电动汽车百人会
<b>刘小诗</b>	中国电动汽车百人会
<b>熊英</b>	中国电动汽车百人会
<b>许晓慧</b>	中国电力科学研究院有限公司
<b>王聘玺</b>	北京交通发展院
<b>陈健华</b>	能源基金会（美国）北京代表处
<b>胡泽春</b>	清华大学
<b>苗红</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>刘岱宗</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>袁敏</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>李相宜</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处
<b>周立欢</b>	世界资源研究所（美国）北京代表处

## 作者介绍

薛露露是世界资源研究所（美国）北京代表处研究员。电子邮件：[lxue@wri.org](mailto:lxue@wri.org)

夏俊荣是中国电力科学研究院有限公司高级工程师

禹如杰是中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心高级技术经理

任焕焕是中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心总监助理

刘勇是中国汽车技术研究中心有限公司数据资源中心工程师

刘鹏是北京理工大学副教授

韦围是北京理工大学研究生

## 出资方



## 图片说明

Cover Flickr/stefanbayer; pg. 1 Unsplash/Fré Sonneveld; pg. 6 Unsplash/American Public Power Association; pg. 12 Flickr/janitors; pg. 18 Flickr/sustainabletransportcn; pg. 21 Flickr/sustainabletransportcn; pg. 22 Flickr/sustainabletransportcn; pg. 29 Flickr/sustainabletransportcn; pg. 30 Unsplash/Liu Haichao; pg. 33 Flickr/sustainabletransportcn; pg. 36 Flickr/etcleanfuels; pg. 41 Flickr/iloveboeing; pg. 42 Flickr/janitors; pg. 44 Flickr/autisticreality; pg. 51 Flickr/dbbdesignco; pg. 52 Unsplash/Denys Nevozhai; pg. 58 Unsplash/Jan Kaluza; pg. 71 Unsplash/wong zihoo; pg. 77 Unsplash/John Cameron; pg. 78 Flickr/tishin; pg. 85 Flickr/autisticreality; pg. 86 Unsplash/Jan Kaluza.

## 关于世界资源研究所

世界资源研究所是一家独立的研究机构，其研究工作致力于寻求保护环境、发展经济和改善民生的实际解决方案。

### 我们的挑战

自然资源构成了经济机遇和人类福祉的基础。但如今，人类正以不可持续的速度消耗着地球的资源，对经济和人类生活构成了威胁。人类的生存离不开清洁的水、丰饶的土地、健康的森林和安全的气候。宜居的城市和清洁的能源对于建设一个可持续的地球至关重要。我们必须在未来十年中应对这些紧迫的全球挑战。

### 我们的愿景

我们的愿景是通过对自然资源的良好管理以建设公平和繁荣的地球。我们希望推动政府、企业和民众联合开展行动，消除贫困并为全人类维护自然环境。

### 我们的工作方法

#### 量化

我们从数据入手，进行独立研究，并利用最新技术提出新的观点和建议。我们通过严谨的分析、识别风险，发现机遇，促进明智决策。我们重点研究影响力较强的经济体和新兴经济体，因为它们对可持续发展的未来具有决定意义。

#### 变革

我们利用研究成果影响政府决策、企业战略和民间社会行动。我们在社区、企业和政府部门进行项目测试，以建立有力的证据基础。我们与合作伙伴努力促成改变，减少贫困，加强社会建设，并尽力争取卓越而长久的成果。

#### 推广

我们志向远大。一旦方法经过测试，我们就与合作伙伴共同采纳，并在区域或全球范围进行推广。我们通过与合作伙伴交流，实施想法并提升影响力。我们衡量成功的标准是，政府和企业的行动能否改善人们的生活，维护健康的环境。

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。  
世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。







世界资源研究所  
WORLD RESOURCES INSTITUTE

世界资源研究所（美国）北京代表处  
北京市东城区东中街9号  
东环广场写字楼A座7层K-M室  
邮编：100027  
电话：+86 10 6416 5697  
[WWW.WRI.ORG.CN](http://WWW.WRI.ORG.CN)