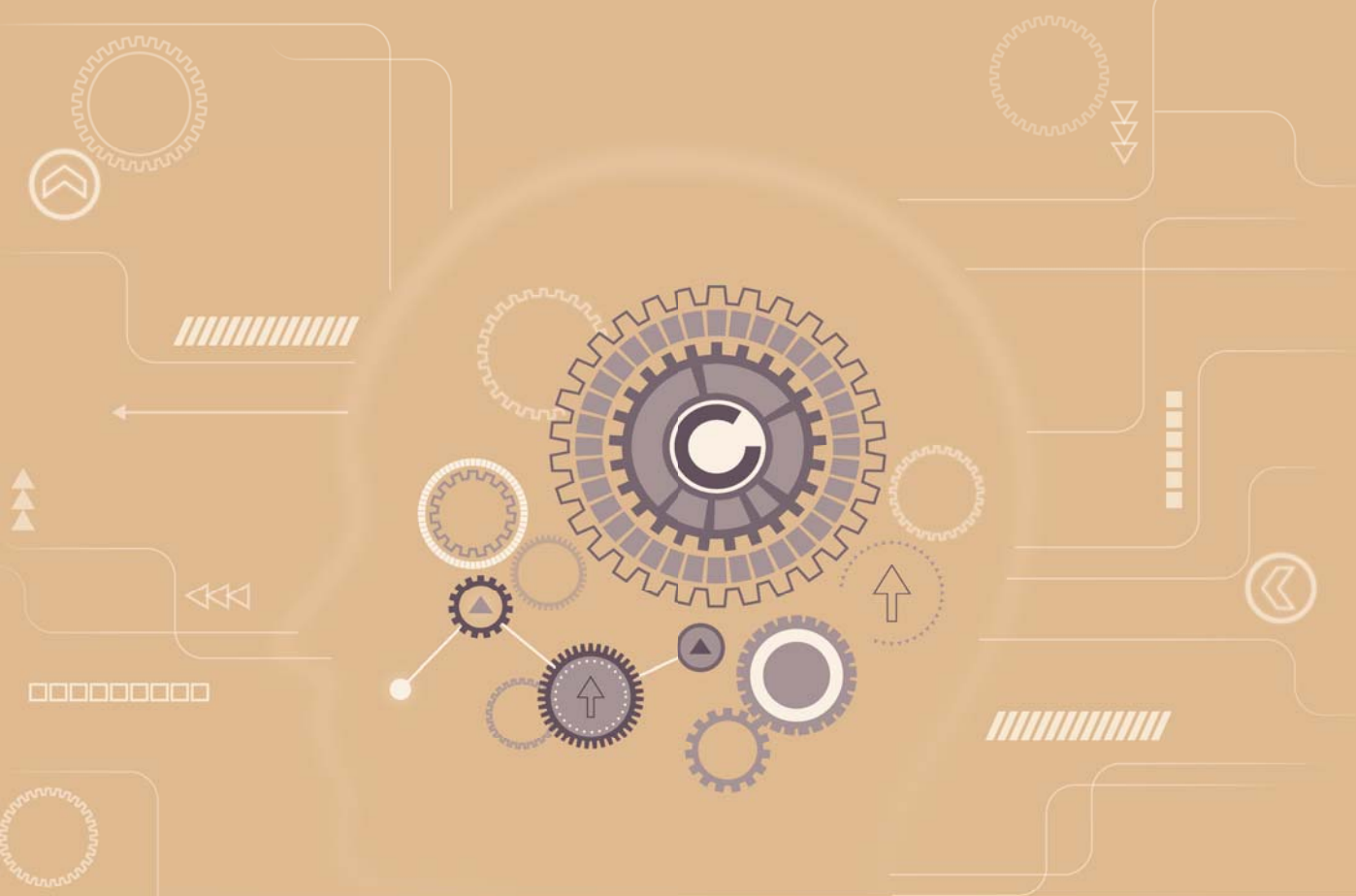




第 1 章

概 述



1.1 电动汽车及其发展历程

能源与环境是新世纪人类文明面临的两大挑战,随着能源价格的不断高企和环境保护舆论的不断高涨,节能与减排已成为迫在眉睫的现实问题。汽车是石油消费的重要领域之一,传统能源汽车尾气排放对环境造成了严重污染。伴随着“双碳”战略目标的提出及“新型电力系统”建设的持续推进,电动汽车(Electric Vehicle, EV)作为新能源汽车的主要形式,以低排放和高能效等特点,成为汽车产业升级、交通低碳化和能源电力转型的重要突破口。

1.1.1 电动汽车的发展历程

电动汽车的发展历史比内燃机汽车还长,最早可以追溯到 19 世纪。电动汽车的发展可以划分为以下 3 个阶段。

第一阶段,1834 年,托马斯·达文波特(Thomas Davenport)于美国制造出世界上第一辆干电池驱动的电动三轮车,为后来的有轨电车电气化开辟了道路。1832—1839 年,罗伯特·安德森(Robert Anderson)发明了第一辆电池驱动的马车,比卡尔·弗里德里希·本茨(Karl Friedrich Benz)在 1886 年发明的世界上第一辆内燃机汽车要早半个世纪。随着蓄电池技术的发展,1881 年法国人古斯塔夫·特鲁夫(Gustave Trouvé)使用铅酸蓄电池和直流电机设计出了第一辆可充电的电动汽车。电动汽车因其运行和维护简单、无污染且无噪声的特点备受欢迎。19 世纪末至 20 世纪初,电动汽车日益兴起。

第二阶段,1920 年后,随着石油资源的进一步开采和内燃机技术的提高,电动汽车逐渐失去了优势。车辆市场逐步被内燃机驱动的汽车占据,只有少数城市保留着很少的有轨电车和无轨电车及使用领域有限的电瓶车。电动汽车的发展从此停滞了大半个世纪。相应地,与电动汽车有关的技术包括电驱动、电池材料、动力电池组、电池管理等也未能得到进一步的发展和运用。

第三阶段,20 世纪 90 年代至今,随着电池储能技术的发展,面对石油资源日益减少、油价不断升高及大气污染等问题,人们开始重新关注电动汽车,世界各国陆续开展了电动汽车的新一轮研发。1990 年 9 月,美国加州政府通过的法律

规定了“零排放车辆”(Zero Emission Vehicle, ZEV)的销售比例,随后各州效仿立法,这些措施推动了美国及世界范围内电动汽车的迅速发展。特别是2000年后,各国相继推出了大量的相关规定和补贴政策,以促进电动汽车的发展。

如图1-1所示,自20世纪90年代起,中国的电动汽车产业分别经历了研发布局阶段(1991—2005年)、产业化准备阶段(2006—2010年)、示范推广阶段(2011—2015年)和产业化发展阶段(2016年至今)。其中,研发布局阶段主要着重于电动汽车相关领域的各项研究,产业化准备阶段,国家开展了电动汽车小规模示范应用,包括“十城千辆”工程及启动私人购买电动汽车补贴试点工作等。示范推广阶段,国务院发布了《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》(国发〔2012〕22号),确定了新能源汽车产业化目标。自2015年起,中国新能源汽车产销量连续7年位居世界第一。自2016年起,新能源汽车产业进入产业化发展阶段,这一时期颁布的多项政策和发展规划,将电动汽车确立为汽车强国战略突破口,极大地推动了电动汽车产业的加速规模化生产和应用,加快了充电桩等相关基础设施和服务体系建设,确立了未来中国电动汽车产业高质量发展的基调。



图 1-1 中国电动汽车产业发展典型阶段

1.1.2 电动汽车的发展现状

全球新能源汽车产业市场日趋成熟,新能源汽车产业呈爆发式增长,各国关于新能源汽车和相应的充电桩基础设施、服务体系和规章制度建设也在同步高速发展。根据国际能源总署(International Energy Agency, IEA)2017—2022年每年度



发布的《Global EV Outlook》统计数据，2017—2021 年全球主要国家和地区电动汽车销量情况如图 1-2 所示。其中，2021 年全球电动汽车销量为 660 万台，2021 年每周电动汽车销量均超过 2012 年全年电动汽车销量。中国电动汽车销量在 2021 年增长了近两倍，达到 330 万辆，约占全球销量的一半。

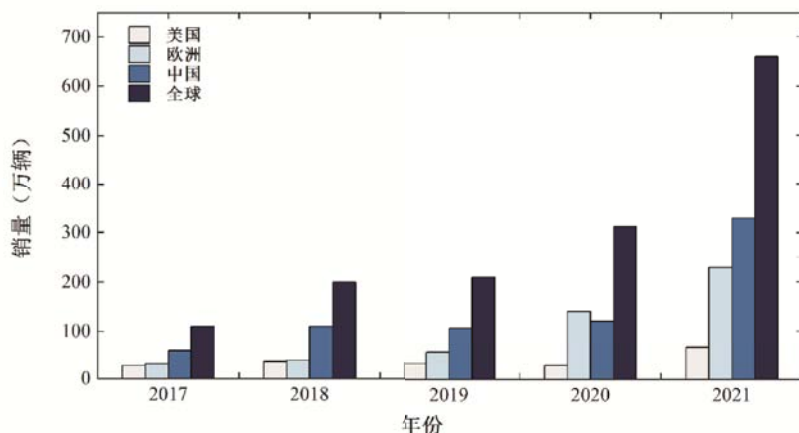


图 1-2 2017—2021 年全球主要国家和地区电动汽车销量情况

2021 年，全球超过一半的电动汽车都是在中国组装的，制造成本的降低大大缩小了电动汽车与传统汽车的价格差距。从可使用的车型种类上来看，2021 年全球可供使用的电动汽车车型达到了 450 余种，较 2020 年增加了 15% 以上，是 2018 年可用车型数量的两倍多。其中，中国提供了最广泛的产品组合，有近 300 种车型可供选择，欧洲有 184 种，美国有近 65 种。

中国市场为电动汽车提供了早期的扩张机会，国家政策也在支持电动汽车制造能力的拓展和部署。随着电动汽车的销售数量、车型数量的攀升，电动汽车市场规模逐渐扩大，其充电需求也在与日俱增。分布合理及使用经济的充电基础设施是当前电动汽车销售量持续增长的重要保障。2022 年，中国电动汽车的销量达到 688.7 万辆，充电桩增量为 259.3 万台，车桩增量比达到 2.7:1。目前，充电基础设施的建设基本能满足电动汽车的快速发展。

预计到 2035 年，电动汽车将成为新销售汽车的主流。当前，电动汽车虽然发展迅速，但在技术层面仍有较大的发展空间，相关的充电基础设施和相应服务体系建设还有待进一步提高与完善。为了实现 2030 年“碳达峰”、2060 年“碳中和”的目标，我国必须要在电动汽车领域进行长足的研究，除了提升电动汽车自身性能所需的技术水平外，还要同时兼顾相关的配套基础设施、服务体系建设，以促进电动汽车更好的发展。

1.1.3 电动汽车对电网的影响与挑战

能源生产和利用的低碳转型是实现可持续发展目标的必要途径。可再生能源，特别是风电和光伏发电技术，具有供电不稳定、难以准确预测等固有特性，给电网调度带来了新的挑战。通过电动汽车的有序充电、电量反送、退役电池梯次利用等方式，大量电动汽车作为分布式储能为电力系统提供可观的灵活性资源，可有效提升电力系统对间歇性可再生能源的消纳能力。电动汽车参与电网调节，促进可再生能源消纳的主要途径包括以下几种。

(1) 有序充电：在家用等应用场景下，电动汽车停车驻留时间长，在满足电动汽车充电需求的前提下，运用实际有效的经济或技术措施引导、控制和改变电动汽车的充电时间，可以实现充电负荷在时间跨度的转移，对电网负荷曲线进行削峰填谷。

(2) 电量反送：随着电动汽车 V2G(Vehicle to Grid)技术的发展，电动汽车能够实现给电网供电，成为电网重要的用户侧分散式储能资源。相应地，作为电网和可再生能源的缓冲，在有序充电模式的基础上，电动汽车可以进一步为电网提供调峰、调频和备用等辅助服务。

(3) 退役电池梯次利用：电动汽车动力电池下降到一定程度后将无法满足电动汽车的使用标准，但退役电池可以梯次应用于储能系统，稳定间歇性可再生能源发电的输出功率，降低峰谷负荷，满足智能电网能源双向互动的要求。

电动汽车通过直接或间接的方式参与电网调节，可显著提升电力系统可再生能源的消纳能力，具有可观的储能潜力和经济性。但随着电动汽车规模化发展，大量电动汽车接入电网时，其对电网的影响也是不容忽视的，它给电网带来了不小的挑战，主要表现在以下几个方面。

(1) 随着电动汽车应用的规模化，电动汽车接入电网后造成的负荷增长也将增加发电、输电、配电系统的压力。这要求电力装机容量与电力输送设备也必须随之调整，以应对大量电动汽车在负荷高峰时段充电的情况。

(2) 电网运行优化控制难度的增加。电动汽车用户选取充电时间和空间的不确定性，产生具有随机性的电动汽车充电负荷，增加了电力系统的调度难度和运营成本，对电网的优化控制提出了更高的要求。

(3) 充电设施及大量电动汽车充电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应电动汽车大规模接入的情景，对配电系统规划及运行方式提出了新的要求与挑战。

(4) 电动汽车充电过程主要完成交直流功率变换，所使用的电力电子设备将产生大量谐波，对配电网系统的电能质量产生影响，如功率损耗、电压和频率偏差等，会影响电气设备的使用寿命。

电动汽车作为近年来发展最为迅速的新兴需求侧主体之一，为电网带来新的发展机遇的同时，也给电网的本地调度运行和管理带来了不小的挑战。在未来，为促进电动汽车顺利、蓬勃的发展，传统电网在其规划、设计、运行和控制技术等方面势必需要寻求更多的研究、创新和突破。

1.2 电动汽车充电设施分类与技术发展

如前文所述，电动汽车将逐步代替传统能源汽车，成为主流的公路出行交通工具。尽管电动汽车的发展得到了很多国家和政府政策的大力支持和鼓励，其推广仍然面临着诸多问题。其中，电动汽车动力电池有限的能量密度和高成本是其发展的主要瓶颈之一。锂电池的能量密度仅约为汽油的 $1/95$ ，电动汽车必须经常进行充电补能，每次充满电都需数小时。作为电动汽车大规模推广的必要条件，完善的电动汽车的补能网络必不可少。当前，电动汽车的主流补能方式有两种：一是充电方式，即通过各类充电设施为整车直接充电的电能补给方式；二是换电方式，指用充满电的新电池组替换电量耗尽的旧电池组的电能补给方式。本节将主要介绍电动汽车的充电设施分类标准、主流充电技术，以及前沿充电技术与模式创新。

1.2.1 充电设施分类标准

随着电动汽车充电技术的不断发展和车主充电需求的差异化发展，电动汽车充电设施呈现多样化趋势。表 1-1 所示为从充电方式、服务范围、安装方式、充电接口和能量传输等维度对现有的电动汽车充电设施进行了分类。

表 1-1 充电设施分类标准

分类维度	分类内容	特 征
充电方式	交流充电桩	功率较小,无法快速充电,充电时长 5~8h
	直流充电桩	也称为“快充”,充电时长 0.5~2h
服务范围	公共充电桩	在公共场所为社会车辆提供充电服务
	专用充电桩	单位(企业)自有停车场,出租车、公交车专用停车场等
	私人充电桩	建设在个人自有车位,受众为私人用户
安装方式	落地式充电桩	安装在不靠近墙体的停车位
	挂壁式充电桩	安装在靠墙体的停车位
	移动式充电桩	移动充电机器人可在导轨上移动,实现桩找车
充电接口	一桩一充	一个充电桩只对应一辆汽车
	一桩多充	支持多台电动车充电,加快充电效率
能量传输	有线充电	通过实体电力线路传输电能
	无线充电	通过无形的磁场变化传输电能

电动汽车充电技术仍在不断发展,电动汽车充电设施的商业模式探索尝试也从未停止,未来的电动汽车充电设施种类更加多样,适应多种充电场景和充电需求。

1.2.2 主流充电技术

目前,我国公共充电领域以直流快充为主、交流慢充为辅,其他充电方式为补充。在私人充电领域还主要是交流慢充。近年来,电动汽车充电技术与标准体系都得到了补充和完善,主流充电技术运用逐步进入成熟阶段。

1. 交流充电

交流充电桩的输入端与电网相连接,充电桩内部不经过整流变换,输出也是交流电。在整个充电过程中起到了控制电源导通和断开的作用,其充电速度通常



较慢。在通常情况下，电动汽车使用该充电方式进行充电时，需要 5~8h 才能完成电池的充电工作，因此，交流充电方式也称为慢充。私人充电桩通常都采用交流充电方式，目前市面上主流的交流慢充桩额定充电功率为 7kW，大部分私家电动汽车用户一般在停留时间较长的地点选择慢充。虽然交流充电速度较慢，但是对电动汽车电池的损害相对较小，建设费用较低，充电安全性较高且安装较简便，仍然是主流的充电方式之一。

2. 直流充电

直流充电输入的是交流电，通过电源模块进行交直转换后输出直流电，对电动汽车进行直流充电。快充功率通常在 30kW 以上，其充电电流是交流充电的数倍至数十倍。随着相关技术的不断深入研究，目前市场上的快充功率已经能够达到上百千瓦。在通常情况下，采用快速充电的方式能够在 0.5~2h 内将电池电量状态充至 80% 左右。对于剩下 20% 的电量，比起前半段的充电速度会相对放缓。随着电动汽车规模的不断扩大，用户已经不满足于慢充，更多的用户更加倾向于选择快充，对直流市场充电的需求日益增长。但是由于输出的电流较大，发热量也较大，所以直流充电桩的桩体体积较大，占地面积也较大，一般适用于需要快速充电的场合，解决临时充电的问题。直流充电桩的输出电流和输出功率较大，与电网连接时会对电网产生较大的冲击，因此在建设直流充电桩时需要加入一些对电网的保护措施。

3. 换电

与充电的方式相比，换电最显著的特点是便捷性。用户采用此方式进行补能时，无须等待过长时间，从拆卸电量告急电池到重新安装电量充足电池，通常只需几分钟。理论上，换电比快充更能良好地服务于电动汽车用户。受电池型号及大小必须统一的限制，目前换电方式主要适用于公交车、出租车等专有车辆。换电方式的优点在于：第一，换电过程快捷，使用半自动或者全自动换电机械装置进行换电操作，整个过程只需几分钟；第二，支持电池租赁方式，可减少初始购车成本；第三，采用分散换电、集中充电方式，便于进行灵活电能管理，换下的电池可以在夜间用电低谷期进行统一协调充电。但就现阶段发展情况来看，换电模式的应用依然面临一些问题：从宏观角度看，各大供应商、制造商、品牌方等，所生产和销售的电动汽车型号各异，其对应的电池更是多种多样。若想实现对各

类型用户的电能补给需求，势必需要布设较多类型的充换电站，在该市场未标准化的前提下，需投入大量的物力、人力。

1.2.3 前沿充电技术与模式创新

近年来，除了上述主流充电技术，多种前沿的充电科技拓宽了人们对于电动汽车充电的想象，也让更方便更经济的充电方式成为可能。

1. 无线充电

图 1-3 所示为典型的电动汽车无线充电系统基本结构，包括电力电子变换器、谐振网络、发射线圈、接收线圈、整流滤波和电池负载等部分。无线充电与传统充电方式主要区别在于通过该方式对电动汽车电能补给时不需要相互接触。在停车位布设该种充电设备时，有充电需求的用户依然需要像使用传统充电方式一样在指定地点持续停留一段时间，其优势在于用户使用时的充电安全性。还有一种更为理想的充电方式是将相应的充电系统铺设在路面之下，当用户驾车行驶过该路段时就能进行充电。目前电动汽车无线充电方式还处于研究和验证阶段，随着后续技术的发展，未来无线充电将拥有较大的市场潜力。

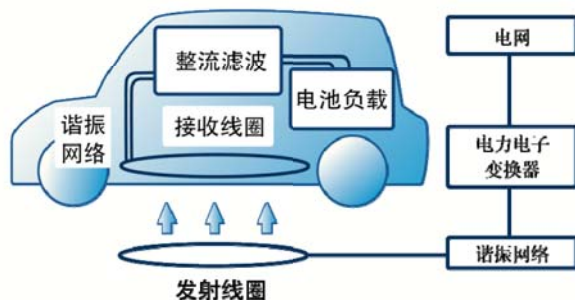


图 1-3 典型的电动汽车无线充电系统基本结构

2. 大功率直流快充

大功率直流快充，是指能满足未来长续航里程电动汽车充电时长 10~15min 的要求、充电功率超过 350kW 的直流充电技术。部分车企将其命名为超级充电技术，但充电速度的提升也伴随着安全风险的提升。大功率充电产生的高电压、大电流，容易积累大量热量，不仅会加速电缆绝缘层或护套的老化，而且会损坏充电设施，对生命和财产构成威胁。大功率充电设备价格较为昂贵，且需要较大场



地进行设备配套及安装,电力增容、建设、运营和维护费用较高,满足大功率快充所需的动力电池、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等零部件成本较高,整车成本提升较为明显。国内部分整车和充电设备生产企业进行了大功率充电产品的研发和技术储备。高电压大电流车辆平台技术难度较高,部分核心零部件技术尚未掌握,目前乘用车测试车辆最高充电功率为120~200kW。大功率充电设备技术难度相对较低,部分桩企已完成样品开发、生产和验证,产品输出功率普遍可达到350kW以上。

3. 私桩共享

私桩共享是私人充电桩运营的新模式。私桩共享是指拥有私桩的车主将自有私桩在充电桩的闲置时间允许其他人付费充电的商业模式。一方面,私桩共享能够为私桩主人带来额外收益;另一方面,能显著提高充电桩利用率,减少公共桩的设置数量,节约公共资源,提升公众充电满意度。但目前私桩共享模式还存在诸多缺点和问题,包括定价机制不完善、设备损坏难以归责、频繁使用加速损耗等。据统计,当前仅有6%左右的私人桩参与共享。

4. 充电机器人

移动充电机器人接收到充电指令后,可自主规划移动路径、配备自动开盖功能、机械臂末端的充电枪通过视觉识别系统可精准插入待充电的电动汽车充电口内,自动完成插接和充电,并在充电结束后自动返回原处,为自己补电或进入待机状态。充电机器人摆脱了传统的充电方式和线缆束缚,可以通过客户端一键智能充电。此外,充电突破了空间局限,无须基础建设,部署灵活,一台充电机器人可以为停车场内的多台电动汽车充电。移动充电机器人可以从根源上解决燃油车或未充电的汽车占用充电车位的问题,因为并不存在固定的充电车位,停车场范围内任意停车位均可实现充电。

1.3 电动汽车充电设施规划建设需求

作为电动汽车补能网络的重要组成部分,电动汽车充电设施主要包括分散式充电桩、集中式充电站和换电站等。以我国为例,“十三五”时期,我国充电基础设施实现了跨越式发展,在充电技术、设施规模、标准体系、产业生态等方面均

取得显著成效。截至 2022 年年底，全国充电设施规模达到 521 万台，为我国电动汽车产业发展提供了有力支撑。

1.3.1 电动汽车充电设施的发展现状

在绝对数量和技术水平上，当前中国电动汽车充电设施发展处于国际领先水平。其发展历程主要包括以下四个时期。

1) 2010 年之前的萌芽期

2010 年之前充电桩行业还处于探索阶段，充电设施项目以示范为主要目的。2006 年，比亚迪建立了全国首个电动汽车充电站。2008 年，北京奥运会期间建设了国内首个集中式充电站，该充电站可满足 50 辆电动大巴车的充电需求。2009 年，国网上海市电力公司投资建成国内第一座具有商业运营功能的充电站。总的来说，该时期尚未开展规模化的电动汽车充电设施建设，政策方面亦无明显利好。

2) 2011—2014 年的初步发展期

2011—2014 年充电桩市场由国家主导开展规模化建设，主要参与者包括国家电网、南方电网和普天新能源，且以公共汽车或政府内部用车为主，年新增充电桩仅几千台，市场规模较小，以行业摸索为主。

3) 2015—2018 年的扩张发展期

2014 年 11 月，《关于新能源汽车充电设施建设奖励的通知》(财建〔2014〕692 号)出台，首次将新能源汽车购置环节与充电设施补贴挂钩，特来电、星星充电等民间资本加入市场。2015 年，国家发展改革委、工业和信息化部等四部委联合发布的《电动汽车充电基础设施发展指南(2015—2020 年)》(以下简称《发展指南》)(发改能源〔2015〕1454 号)提出到 2020 年建设 480 万台充电桩、车桩比达到 1:1 的发展目标，大规模的投资建设开启，促使 2015 年和 2016 年充电桩增速分别达到 743%和 233%。

4) 新型基础设施建设时期

2020 年 3 月，充电桩被正式纳入新型基础设施建设，政策补贴由新能源车向充电设施倾斜，行业逐渐成熟，部分企业也开始盈利，而行业的方向由建设端向质量更高的运营端转移，在技术、市场及盈利模式上将产生变革，充电基础设施发展迎来新机遇。

然而，表面的机遇之下，当前的充电设施发展也存在一定的问题与挑战。由



于涉及城市规划、建设用地、建筑物及配电网改造、居住地安装条件、投资运营模式等方面，利益主体多，推进难度大。电动汽车及其充电技术的不确定性大。电动汽车产业尚处于发展初期，动力电池及充电等关键技术发展日新月异，不同技术方案对应的充电需求存在较大差异，增加了充电基础设施建设与管理的难度，加大了投资运营风险，影响了社会资本参与的积极性。

首先，充电基础设施与电动汽车发展不协调。在电动汽车产业发展的过程中，普遍存在注重车而不注重充电基础设施的问题，有车无桩、有桩无车现象并存。一方面，部分地区电动汽车增长较快，但充电基础设施建设规模不足。另一方面，用户对电动汽车接受度不高及地方保护等原因，使得电动汽车增长总体低于预期，加上部分充电基础设施建设布局不合理，以及设施通用性较差等问题，造成充电基础设施利用率较低。其次，充电基础设施建设难度较大。充电基础设施建设需要规划、用地、电力等多项前提条件，在实施过程中涉及多个主管部门和相关企业。另外，在社会停车场所建设充电基础设施，面对众多分散的利益主体，协调难度大。

在私人乘用车领域，大量停车位不固定的用户不具备安装条件。对于具备安装条件的用户，存在业主委员会不支持和物业服务企业不配合的现象。此外，充电基础设施还涉及公共电网、用户侧电力设施、道路管线等改造，也增加了建设难度。充电服务的成熟商业模式尚未形成。在部分城市的公交、出租等特定领域，通过实行燃油对价、峰谷电价、充电服务费等措施，商业模式探索取得一定进展，但仍不具备大范围推广应用的条件。在公共充电服务领域，商业模式探索处于起步阶段，电动汽车数量少、设施利用率低、价格机制不健全等原因，使充电服务企业普遍亏损。已颁布的部分技术标准未严格执行，造成不同品牌的电动汽车与不同厂商的充电基础设施不兼容。充电基础设施相关工程建设标准有待进一步完善，充电设施与充电服务平台的通信协议、结算体系等标准不统一，充电服务平台的服务能力和质量未能满足用户需求。因此，充电基础设施标准规范体系需要进一步构建，充电基础设施设备接口、通信协议等技术标准亟须完善。

1.3.2 电动汽车充电设施发展的政策导向

2014年以前，国家出台了一系列新能源汽车推广相关政策、标准和监管要求，但在电动汽车充电基础设施领域缺乏明确的政策文件予以专门指导。为落实国务

院办公厅《关于加快新能源汽车推广应用的指导意见》(国办发〔2014〕35号)的要求,2015年9月,国务院办公厅发布了《关于加快电动汽车充电基础设施建设的指导意见》(国办发〔2015〕73号);2015年10月,国家发展改革委等四部委联合发布了《发展指南》。两份纲领性文件确立了我国充电设施行业发展的基本格局,补全了我国电动汽车产业政策长期以来“重车辆推广应用,轻充电基础设施配套”的短板,破解了充电基础设施行业发展中存在的认识不统一、配套政策不完善、协调推进难度大、标准规范不健全等难题。到2020年,提出基本建成适度超前、车桩相随、智能高效的充电基础设施体系,满足超过500万辆电动汽车的充电需求。具体地,提出到2020年新增集中式充换电站超过1.2万座,分散式充电桩超过480万台。

充电基础设施补贴方面,相关文件明确提出要加大对充电基础设施补贴力度,奖补资金开始由补贴电动汽车向补贴充电设施转移。2016年1月,财政部等五部委联合发布《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》(财建〔2016〕7号),首次明确中央财政对各省份按照新能源汽车推广数量给予充电基础设施建设运营奖补资金。2018年11月,国家发展改革委等四部委联合发布《提升新能源汽车充电保障能力行动计划》(发改能源〔2018〕1698号),提出千方百计满足“一车一桩”的接电需求,并强调将地方购置补贴转向支持充电基础设施建设运营,并采用“互联网+”方式加强对受补设施的事中、事后监管。2019年3月,财政部等四部委联合发布《关于进一步完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》(财建〔2019〕138号),进一步要求各地方政府将新能源汽车地方补贴转化为用于补贴充电基础设施建设运营,奖补资金开始由中央财政奖补逐渐转为“中央财政主导、地方财政配套”奖补。

针对不同充电场景,国家也相应地发布了各类型电动汽车充电基础设施发展的指导意见。2016年8月,国家发展改革委、国家能源局等四部委联合发布《关于加快居民区电动汽车充电基础设施建设的通知》(发改能源〔2016〕1611号),提出对居民区专用固定停车位按“一表一车位”模式进行配套供电设施增容改造。2016年12月,国家发展改革委、住房和城乡建设部等四部委联合发布的《关于统筹加快推进停车场与充电基础设施一体化建设的通知》(发改基础〔2016〕2826号)提出,推进停车场与充电基础设施一体化建设,以有效满足电动汽车充电基本需求。2017年1月,国家能源局、国务院国有资产监督管理委员会、国家机关事务管理局联合发布的《加快单位内部电动汽车充电基础设施建设》(国能电力



(2017) 19 号)提出,到 2020 年,公共机构新建和既有停车场规划建设配备充电设施(或预留建设安装条件)比例不低于 10%。

近年来,电动汽车充电基础设施发展的战略地位逐步提升。2020 年,中央将电动汽车充电基础设施建设纳入新型基础设施建设。同年,工业和信息化部发布的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》提出,积极推广智能有序慢充为主、应急快充为辅的居民区充电服务模式,加快形成适度超前、快充为主、慢充为辅的高速公路和城乡公共充电网络。2022 年 1 月,国家发展改革委等部门《关于进一步提升电动汽车充电基础设施服务保障能力的实施意见》(以下简称《实施意见》)(发改能源规〔2022〕53 号)提出,对于城市公共充电网络,要合理布局,多方兼顾。在新商业模式探索、新一轮政策指导作用下,充电基础设施发展新通道开启,迎来新机遇。

1.3.3 国内外电动汽车充电设施建设水平

1. 中国

根据中国电动汽车充电基础设施促进联盟发布的数据,截至 2021 年 12 月底,全国充电基础设施累计数量为 261.6 万台。其中,公共交流充电桩数量为 67.7 万台,公共直流充电桩数量为 46.9 万台,公共充电设施总量为 114.6 万台,较 2020 年增加 34.0 万台。随车配建私人充电桩数量激增,累计保有量达 147 万台,同比增长 68.19%(见图 1-4)。公共充电场站共计 7.5 万座。

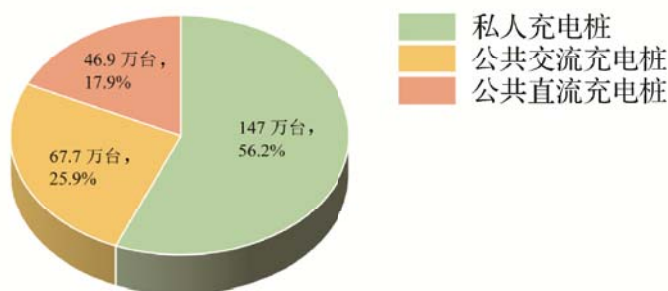


图 1-4 2021 年中国电动汽车充电基础设施保有量数据

目前,我国充电基础设施的建设基本能满足电动汽车的快速发展。2021 年,中国充电基础设施增量为 93.6 万台,新能源汽车销量为 352.1 万辆,充电基础设施与新能源汽车呈爆发式增长,车桩增量比为 3.8:1。同时根据相关统计,2022

年,中国电动汽车的销量达到 688.7 万辆,充电桩增量为 259.3 万台,车桩增量比下降到 2.7:1。

2. 美国

根据美国能源部替代燃料数据中心记录,截至 2021 年年底,美国电动汽车充电桩数量已超过 12 万台。美国电动汽车与公共充电桩数量的比例由 2015 年的 12.9:1 增长至 2021 年的 18.2:1。美国政府采用财政支持政策及相关辅助监管措施,并计划在 2030 年实现全美 50 万台电动汽车充电桩的建设目标。

运营模式方面,美国充电桩运营主体主要包括专业充电设施运营商和以特斯拉为代表的整车企业。同时,车企在配建私人充电桩时多选择与专业运营商合作。作为美国充电桩运营龙头企业,驰吉普公司(ChargePoint)在美国市场占有率超过 75%。值得一提的是,驰吉普公司开创了免费充电桩建设模式。在公共桩领域,驰吉普公司以极低价格将充电桩卖给商家,通过收取服务费和盈利分成的形式获取收入,其中大部分商家为用户提供免费充电服务,从而吸引更多的顾客,增加主营业务收益。在私人领域,驰吉普公司为私人用户免费安装住宅区充电桩,用户则按月缴纳服务费,电费则由住宅物业公司收取。此外,驰吉普公司基于全美范围内的电动汽车充电位置共享信息,为用户提供充电站位置、实时充电监控、充电预约提醒、故障报警等信息,同时通过大数据挖掘提供增值服务。

3. 德国

根据相关数据统计,2017—2020 年德国充电基础设施数量,如图 1-5 所示。截至 2021 年 7 月,德国共有充电基础设施 4.57 万个。其中,快充桩有($>22\text{kW}$) 6600 台,慢充桩有($\leq 22\text{kW}$) 3.91 万台,快充桩占比约为 14.4%。截至 2020 年年底,德国共有 58.9 万辆电动汽车,车桩比约为 14.6:1,平均每 15 辆电动汽车或插电式混合动力车共用一台充电桩。

2022—2023 年,德国计划新建 5 万台公共充电桩,其中 1.5 万台由汽车制造商承担,比如宝马汽车计划至少建造 4100 个充电桩,其他车企也打算同样跟进。为了使电动汽车真正与日常使用兼容,并且可以便捷地在停车场、地下车库和工作场所中充电,德国政府还计划对建筑物和租赁法进行更改。虽然许多充电站正在规划或建设中,但是还需要提高速度。尽管德国的大城市及其周边的卫星城已经修建了众多充电站,但是在德国大面积的农村地带,充电桩的铺设数量仍然紧缺。

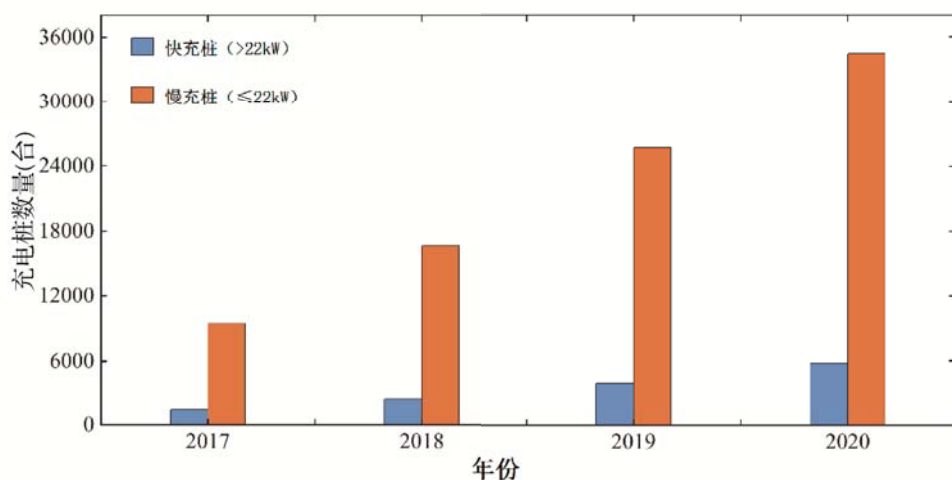


图 1-5 2017—2020 年德国充电基础设施数量

1.4 充电设施运行优化及市场化路径

随着电动汽车的大规模发展,电动汽车充电负荷将成为电网重要的负荷类型。基于有序充电、V2G 电量反送、退役电池梯次化利用等技术,作为负荷侧重要的灵活性可调节资源,通过充电设施运行优化可以提高充电设施运营经济性,降低规模化充电负荷对电网的影响,促进新能源消纳及“双碳”目标落地。同时,随着国内电力市场的进一步发展,推进充电设施商业模式创新,完善电动汽车消费及储放绿色电力的交易和调度机制,探索电动汽车参与电力市场的实施路径已成为当下的热点研究领域。

1.4.1 基于有序充电的充电设施运行优化

考虑到电动汽车具有负荷和储能的双重属性,是具有高度灵活性的移动储能单元,挖掘其参与电网调度的巨大潜力,在电价等信号的合理引导下,电动汽车充电负荷的时间分布和空间分布会随之改变,在某些需要的时段,车辆甚至可以通过 V2G 技术向电网回馈多余的电能,从而实现优化电网潮流分布、促进新能源发电消纳、维持配网节点电压水平、保障电网安全经济运行等目标,有力推动能源供给与交换智能化、互动化的发展。国内政策支持方面,工业和信息化部发布

的《新能源汽车产业发展规划(2021—2035)》提出,要加强电动汽车和电网的能量双向互动,将充电和电网调度需求结合起来,推动产业融合发展。

充电设施运行优化的目标多种多样,优化主体不同,优化目标也各有差异,以下分别介绍不同优化主体的优化目标。

(1) 电网:以电网为优化主体,考虑大规模电动汽车充电负荷对配电网潮流的影响,主要目标为降低配电网网损,改善电压水平。其实现方式包括电网直控车辆、基于聚合商的需求响应等。

(2) 充电站:以充电站为优化主体进行站内能量管理,通常以充电站的综合运行成本最低为目标,运行成本主要包括分时电价下的电量电费成本和两部制电价下的需量电费成本。

(3) 充电站集群和分布式能源聚合商:对于充电设施的优化运行以促进分布式新能源发电消纳、提升聚合商运行经济性为主要目标,同时也可以参与配网需求侧响应、参与辅助服务市场等。

目前,充电设施优化运行以控制电动汽车充电功率和控制充电时间为主要途径,可以简称为有序充电。有序充电结合 V2G 技术可拓展为有序充放电,使电网具备更灵活的调节能力。除此以外,也有部分研究在探索空间层面充电负荷的可控性,通过充电引导等手段,利用车辆的可移动性实现电网的优化目标,丰富了电动汽车与电网的互动形式。

目前应用最为广泛的充电设施优化运行方法是有序充电。有序充电通常应用于停留地充电场景,比如小区共用充电桩、办公区充电桩群。这类充电场景的特点为:车辆在充电设施的停放时间一般远大于车辆充电所需要的时间,且车辆充电方式以慢充为主,可根据需要中断充电或灵活调整充电功率,实现车辆的有序充电。以图 1-6 所示的公共充电站为例,充电站有序充电流程为:每当有新的电动汽车客户接入充电站的充电设施时,充电控制系统可通过客户电动汽车上的电池管理系统获取电动汽车的电池容量及电池荷电状态。为了制定电动汽车有序充电策略,客户需要告知充电站,电动汽车预期的停留时间及客户离开时期望的目标电池荷电状态。在此基础上,控制中心以满足客户需求及充电站变压器不过载为前提制订充电计划,并将计划发布给站内充电装置进行充电。充电站通过有序充电控制,实现经济效益的优化。充电控制方式可划分为不可间断充电与可间断充电。其中,不可间断充电主要优化控制电动汽车的起始充电时间;可间断充电往往将整个可充电时段划分为不同的控制区间,优化各区间内的充电通断。

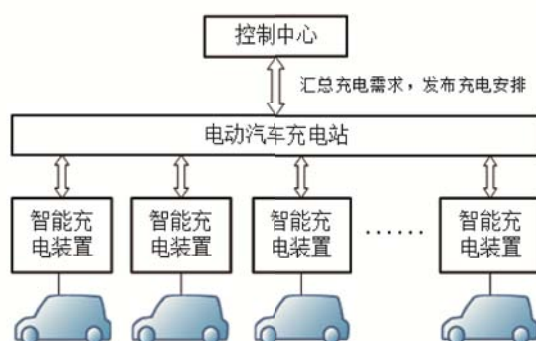


图 1-6 公共充电站示意

有序充电等电动汽车充电设施优化运行手段在国内外已经有广泛的应用。美国通过开放式自动需求响应(Open Automated Demand Response, Open ADR)通信规约及相关应用自动调整用电,例如,在电网面临压力的时候延迟电动汽车的充电时间。日本大力推崇需求响应和虚拟电厂,企业用户或个人用户可通过电动汽车、屋顶光伏和储能装置向负荷聚合商供电。在欧洲,意大利开展 Energy@Home 技术研究,旨在通过家电、智能电表和宽带通信的合理联结实现用户和电网的双向互动,在提高能效水平的同时,降低电网的高峰负荷。爱尔兰针对家庭用户及中小型企业开展了智能计量系统测试、成本效益分析等车网互动相关技术研究,其中比较分析了按月计费、双月计费、户内显示、减负荷激励这 4 类用户反馈模式的效益。在中国,上海、北京、天津、广州等多地均已成功开展电动汽车与电网互动试点。

1.4.2 电动汽车和电网互动试点应用案例

针对可再生能源消纳能力不足、调峰调频压力大等城市电网运行过程中面临的问题与挑战,除了在发电侧加强发电容量建设之外,负荷侧资源的利用也是近年来获得广泛关注的技术手段之一。其中最为有效的手段是负荷侧需求响应。负荷侧需求响应利用市场化的手段更有效地对负荷侧资源进行协调优化,不仅有助于发挥负荷侧的灵活性,还可以推动电力系统向绿色、经济的方向发展。常见的需求响应可以分为基于价格的需求响应(Price-based Demand Response, PDR)和基于激励的需求响应(Incentive-based Demand Response, IDR)两种。其中,基于价格的需求响应是指根据产能成本而动态改变能源价格,目的是在用能高峰期提高价格及在用能低谷期降低价格来平滑负荷曲线;基于激励的需求响应是指通过金钱

补偿激励消费者降低负荷或者直接获得消费者负荷的控制权。同时,按照调控对象的不同,负荷侧需求响应也可分为面向电网的调控、面向建筑楼宇的调控及面向综合能源系统或者微网的调控。

国内外已进行过多次负荷侧资源参与电力需求响应的探索和实践。美国是目前世界上需求响应相关政策最为完善、相关案例最为丰富的国家,美国 Open ADR 通信规约成为目前世界广泛使用的标准化协议。从 Open ADR 1.0 到 Open ADR 2.0,除了涵盖电力市场交易、可再生能源交易、电动汽车控制等更丰富的功能外,还提供更强的数据反馈能力和预测能力。泰国开展了基于 Open ADR 2.0b 协议的办公楼宇需求响应试点项目,该项目通过楼宇能量管理系统及空调控制器有效降低楼宇 53% 的空调能耗。

中国电力市场也十分注重供需互动。2021 年 5 月,上海市通过虚拟电厂聚合储能电站、商业楼宇和电动汽车充电站等多方面资源参与需求响应,削峰和填谷的最高负荷量分别为 15 万 kW 和 50 万 kW,有效促进智慧减碳和挖掘需求侧资源。为应对新能源出力的波动性,宁夏回族自治区开展了“源网荷储”互动试点,设计了基于“荷随源动”的市场交易规则,电力用户和储能按照电网下发的指令调节用电负荷,最后电力成交量为 120 万 kW·h,有效促进了新能源消纳。江苏省也实施过多次激励型需求响应,培养了一大批负荷聚合商,建设了具备毫秒级切负荷能力的“源网荷”互动系统,并提出了一系列配套的电力交易模式。

电动汽车作为近年来发展最为迅速的新兴需求侧主体之一,其在需求响应中发挥价值的方式与能力也获得了广泛的关注。为了探索将这一潜力巨大的需求侧主体纳入电网可调控资源的技术路径和商业模式,国内外还开展过多次电动汽车参与电网需求响应的实际试点项目。美国的 ADR 通信协议中指出,在电网面临压力的时候应延迟电动汽车的充电时间。美国加州电力公司 PG&E 给私人桩用户提供两种分时电价方案,即将 12:00~15:00 和 19:00~7:00 设置为低价时段,鼓励车主充电时避开用电高峰。在 iChargeForward 项目中,100 位宝马车主和梯次利用电动汽车电池的储能多次响应来自 PG&E 的削负荷信号,需要在 1h 内完成削减 90kW 以上负荷量的任务,完成者可获得奖金。该项目在节约用户充电费用的同时还可培养用户的互动意识。能源科技企业意科能源(Enel X)把私人桩用户聚合成虚拟电厂参与电力现货市场竞价,参加的用户可获得电力积分,2019 年 6—9 月,该虚拟电厂共响应 24000 桩次。

在中国,多地积极组织电动汽车参与需求响应的试点活动。2019 年端午假



期, 国网上海市电力公司联合蔚来等车企开展电动汽车充电“填谷”的项目, 对参与的私人车主实施充电补贴, 后续分别开展了针对专用桩和换电站的需求响应试点项目, 探索不同充电模式所适用的需求响应场景。2020 年 4 月, 国网电动汽车公司在北京人济大厦开展了 72h 的 V2G 试点项目, 该项目首次应用 V2G 技术参与电网实时调度和调峰辅助服务。2020 年 5 月, 华北调峰辅助服务市场首次将电动汽车充放电纳入调峰资源, 实现对电动汽车及其他分布式储能资源的联合优化和市场出清结算, 活动共接入 2476 座充电站和 27621 台充电桩。2020 年 9 月, 山西省推出“新能源+电动汽车”协同互动试点方案, 通过车联网线上平台和电力市场交易手段, 充分发挥电动汽车等负荷侧的灵活性, 促进新能源消纳。广州市通过优化负荷聚合商接入环境、推广有序充电管理及建立电动汽车与虚拟电厂的互动模式来激发电动汽车参与需求响应的动力。天津市在中新天津生态城中试点建设了新型电网双向互动充电桩, 支持电动汽车向电网反送电及在电网故障情况下的紧急用电。

部分电动汽车和电网互动试点应用案例如表 1-2 所示。

表 1-2 部分电动汽车和电网互动试点应用案例

地 域	项目/公司名称	内 容
美国	iChargeForward	100 位宝马汽车车主和梯次利用电动汽车电池的储能多次响应来自 PG&E 的负荷削减信号, 需要在 1h 内完成削减 90kW 以上负荷量的任务
美国	Enel X	把私人桩用户聚合成虚拟电厂参与电力现货市场竞价, 参加的用户可获得电力积分, 2019 年 6—9 月, 该虚拟电厂共响应 24000 桩次
中国上海	国网上海市电力公司联合蔚来等车企	开展电动汽车充电“填谷”的项目, 对参与的私人车主实施充电补贴, 后续分别开展了针对专用桩和换电站的需求响应试点项目, 探索不同充电模式所适用的需求响应场景
中国北京	国网电动汽车公司	2020 年 4 月, 国网电动汽车公司在北京人济大厦开展了 72h 的 V2G 试点项目, 该项目首次应用 V2G 技术参与电网实时调度和调峰辅助服务
中国山西	“新能源+电动汽车”协同互动试点	2020 年 9 月, 山西省推出“新能源+电动汽车”协同互动试点方案, 通过车联网线上平台和电力市场交易手段, 充分发挥电动汽车等负荷侧的灵活性, 促进新能源消纳
中国天津	中新天津生态城试点	天津市在中新天津生态城中试点建设了新型电网双向互动充电桩, 支持电动汽车向电网反送电及在电网故障情况下的紧急用电

1.4.3 充电设施运行市场化路径与政策展望

前文所述的电动汽车参与需求响应的实际案例在车网互动的商业模式方面进行了有益的探索，验证了电动汽车参与需求响应的技术可行性，摸索了其实现手段。但与此同时，在现有的以电动汽车参与需求响应为代表的车网互动商业模式中，尚存在一些局限性。首先，目前的电动汽车需求响应试点仍然以邀约式为主，需求响应规模比较局限，需求响应开展流程的自动化程度不够高，且需求响应的补偿资金缺乏可持续机制。在未来电动汽车规模进一步扩大的情况下，必定需要更加高效化、智能化和自动化的车网互动机制及商业模式，充分挖掘电动汽车的可调度资源。

在此背景下，2022年1月，《实施意见》指出，推进车网互动技术创新与试点示范。支持电网企业联合车企等产业链上、下游打造新能源汽车与智慧能源融合创新平台，开展跨行业联合创新与技术研发，加速推进车网互动试验测试与标准化体系建设。积极推进试点示范，探索新能源汽车参与电力现货市场的实施路径，研究完善新能源汽车消费及储放绿色电力的交易和调度机制。探索单位和园区内部充电设施开展“光储充放”一体化试点应用，鼓励推广智能有序充电。各地发展改革、能源部门要引导居民参与智能有序充电，加快开展智能有序充电示范小区建设，逐步提高智能有序充电桩建设比例。各地价格主管部门要抓好充电设施峰谷电价政策落实，鼓励将智能有序充电纳入充电桩和新能源汽车产品功能范围，加快形成行业统一标准。该实施意见从技术手段、标准制定、交易方式和商业模式等多方面对未来电动汽车的车网互动提出了要求和方向引导。

在交易方式层面，未来电动汽车充电设施将由按目录电价结算用电价格转变为在电力现货市场环境下进行市场化电力交易。近年来，为了实现资源有效配置的电力市场化交易，充分发挥市场作用，还原电力商品属性，我国开始了新一轮的电力市场化改革，以放开发用电计划和建设完善的电力市场并重为改革目标。电动汽车作为近年来得到快速发展，且未来在国民电力消费中占比将逐渐提升的新型负荷，其参与电力现货市场的实施路径，以及消费及储放绿色电力的交易和调度机制是亟须解决的关键技术问题。在未来的电力现货市场及配套的电力中长期市场、辅助服务市场、容量市场等市场形态中，当前普遍利用电动汽车有序充电进行的调峰将不再被视为一种辅助服务，而是由电力现货价格信号引导的需求

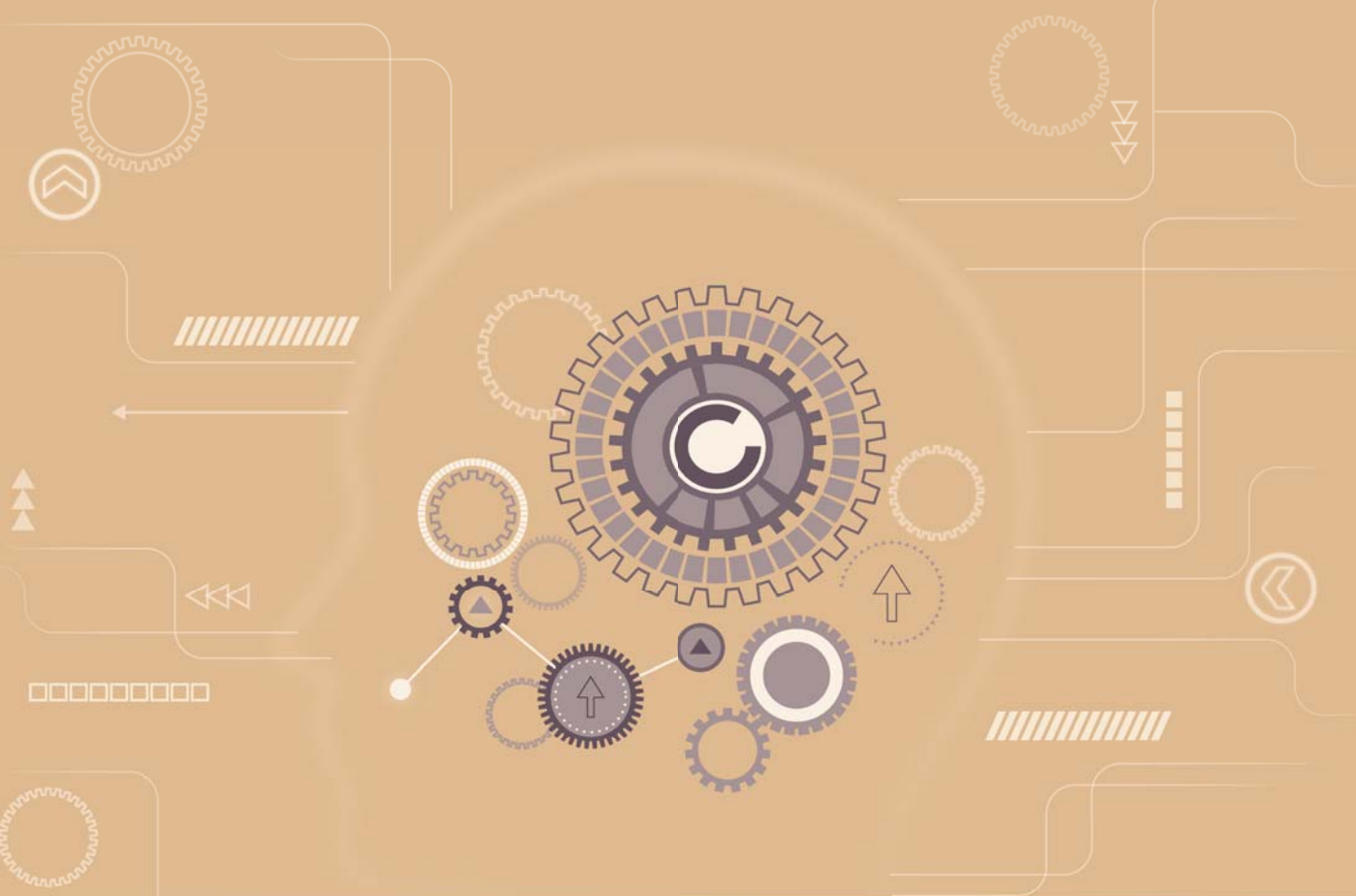


响应,只有调频辅助服务和备用辅助服务才能在辅助服务市场中进行交易。同时,电动汽车充电的电价成本也将不再是峰平谷时段简单划分的单一电价,而是可能需要在电力中长期市场锁定价格、电力现货市场结算差价等多个电能量市场交易环节共同决定的电价成本。因此,对于分散式的电动汽车及充电桩,通过合理的聚合手段,形成一定规模的电动汽车群体用电主体及可调度资源,并作为一个整体参与电力中长期市场和电力现货市场的购售电、在辅助服务市场进行投标并响应调度指令是未来最可能实现的技术路线。而对于集中式的电动汽车充电基础设施,以充电站或充电站联盟为主体在电力市场中进行交易可能是最常见的方式。通过合理的电力市场交易策略,能够促进集中式电动汽车充电设施合理规划车辆充电,实现接入车辆的有序充电和辅助服务及需求响应的资源化。

在商业模式层面,电动汽车充电基础设施与电动汽车之间也可能不局限于单一价格充电的简单模式。未来,充电服务的市场化定价是可探索的方向之一。正如电力现货市场中,可以通过实时价格来反映不同时段、不同负荷水平、不同电网节点下的电力价值,充电服务的实时化、差异化定价手段也是未来进一步促进充电市场良性发展,实现资源合理配置的方式之一。此外,实现电动汽车的资源化也需要有效的商业模式来配合。电动汽车充电负荷聚合商是学术研究中未来负荷侧资源聚合的热门方式之一。一方面,通过负荷聚合商,电动汽车用户可以达到电力市场的准入门槛,并方便地参与各类市场进行获利或降低成本。但另一方面,与负荷聚合商之间的契约关系也不可避免地会让渡电动汽车用户的一部分权利,比如随时随地进行充电的权利。这一权利让渡关系的处理将会影响未来的车网互动商业模式是否能健康有序地发展。由于负荷聚合商一对多的关系,电动汽车与负荷聚合商之间的利益分成模式需要在探索中不断完善,并同时辅以适度的监管,以避免陷入初期无序竞争,以不合理的方式抢夺用户,后期形成垄断,收割用户的商业怪圈中。同时,不同电动汽车之间的公平性原则需要得到有力保证。电动汽车充电本身对电动汽车用户的日常生活有很大的影响,且电动汽车电池的高成本也造成寿命损耗的敏感性,因此“厚此薄彼”式的调用方式必须避免。由于负荷聚合过程中产生的电池损耗、响应获利缺乏可视化的直观手段,因此也可以考虑采用区块链等技术手段,实现每度电有迹可循的过程记录方法,以此建立用户与负荷聚合商之间的信任关系,促进车网互动商业模式良性发展。

1.5 小 结

本章概述了电动汽车及其发展历程，介绍了电动汽车充电设施分类与技术发展现状，归纳了电动汽车充电设施规划建设需求，分析了充电设施运行优化及市场化路径，为发展电动汽车充电设施优化规划与运行研究提供了参考。



第 2 章

电动汽车充电负荷建模与预测



电动汽车是城市交通电气化的重要元素和新型电力系统的重要负荷，具备电力系统用电负荷及路网交通工具的双重属性。以上海市为例，截至 2022 年年底，上海新能源汽车保有量达 94.5 万辆，占汽车总量的 19.81%，扣除报废注销量后仍比 2021 年增加 31 万辆，增长 48.84%。电动汽车充电负荷建模与预测是电动汽车充电设施优化规划与运行的前提和基础。从空间维度，电动汽车充电负荷建模与预测可以分为电动汽车总量预测和充电负荷时空分布预测。从时间维度，电动汽车充电负荷建模与预测可以进一步分为中长期预测和短期预测。

本章根据城市电动汽车总量预测，提出城市电动汽车保有量中长期发展预测方法；根据电动汽车充电负荷时空分布预测，提出城市广域电动汽车充电负荷时空分布预测方法；根据充电站运行优化需求，提出数据驱动的电动汽车充电站超短期负荷预测方法。

2.1 城市电动汽车保有量中长期发展预测方法

电动汽车作为新产品进入市场和对传统燃油汽车的替代，从数量和总产值上都是汽车行业发展历程中前所未有的。对充电需求规模的预测是城市电网应对大规模充电挑战的必要前提，而充电需求规模的预测需要结合电动汽车数量增长、能耗水平和居民出行习惯数据等多方面因素来进行。

与居民出行习惯的相对稳定相比，考虑市场结构、政策法规的电动汽车数量预测及不确定性分析是充电需求规模预测的关键。大型城市人口密集、用电负荷密集、交通密集，也通常作为政策的重点示范区域，电动汽车规模发展受多种因素影响和制约，诸如市场容量、竞争格局、交通发展等因素，需要对电动汽车市场规模、发展速度和总量展开研究。在此背景下，本节对城市电动汽车保有量的中长期发展预测方法进行介绍，为充电需求规模预测提供基础。

2.1.1 电动汽车市场规模预测方法

传统燃油汽车的数量预测模型可以为电动汽车群体数量预测提供参考，但是政策因素和技术创新因素在电动汽车发展进程中具有更大的影响力，需要对相关模型进行改进和修正。同时，在电动汽车数量预测中必须考虑现有燃油车的占位

效应和其在新增市场中的竞争效应。

电动汽车数量预测模型主要有微观模型和宏观模型两种技术路线。微观模型对影响车主购买电动汽车的因素建模,包括能源价格、电池成本、品牌宣传、社会认同等,获得单一车主的购买意愿并进一步开展多智能体模拟。有研究将上述影响因素归结为人口因素、环境因素和心理因素三类,但同时指出,微观模型需要基于细致的因子分析和详尽的数据集,否则会导致不同地区模型的形式差异明显。因此,这一方法依托大规模统计普查,常用于对一个国家范围内的电动汽车发展态势建模。宏观模型基于电动汽车市场销量和数量建立预测模型,对数据规模要求低,适用于用户特征一致性较高的地区,以避免平均效应的影响。同一个城市内,经济发展水平差异较小,各区域政策统一,在电动汽车普及中前期相关数据集不够完备的情况下,适合采用宏观模型进行数量预测。

扩散模型是描述一种新产品进入市场,或一种新技术得到应用的态势过程。常见的扩散模型包括四种,冈伯茨模型(Gompertz Model, GM),罗吉斯蒂克模型(Logistic Model, LM),巴斯扩散模型(Bass Diffusion Model, BDM)和洛特卡-沃尔泰拉模型(Lotka-Volterra model, LVM),如表 2-1 所示。

表 2-1 典型技术扩散模型及其增长率

模型名称	增长率解析形式	增长率差分形式
冈伯茨模型	$Y(t) = Ke^{e^{(\alpha-\gamma t)}}$	$\frac{dY}{dt} = \gamma \cdot Y \ln\left(\frac{K}{Y}\right)$
罗吉斯蒂克模型	$Y(t) = \frac{K}{1+e^{(\alpha-\gamma t)}}$	$\frac{dY}{dt} = \frac{\gamma}{K} \cdot Y(K-Y)$
巴斯扩散模型	$Y(t) = K \frac{1-e^{-(p+q)t}}{1+\frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}$	$\frac{dY}{dt} = \frac{p}{K}(K-Y)^2 + \frac{p+q}{K}Y(K-Y)$
洛特卡-沃尔泰拉模型	$Y(t) = Y_1(t) + Y_2(t)$	$\frac{dY_1}{dt} = \frac{\gamma_1}{K}Y_1(K - Y_1 - \beta_1Y_2)$ $\frac{dY_2}{dt} = \frac{\gamma_2}{K}Y_2(K - Y_2 - \beta_2Y_1)$

其中,前两种模型都属于 S 形曲线模型,建立每一状态下内外部因素对种群增长率的影响模型,可近似统一处理。巴斯扩散模型首次被提出时用于耐用消费品扩散趋势研究,效果良好。该模型形式简洁,仅涉及三个变量,包括电动汽车的市场空间 K 、表征供给侧创新系数的外部因子 p 和表征需求侧模仿系数的内部因子 q 。巴斯扩散模型包含了 S 形曲线族预测模型的信息,是更具有一般性的



模型。电动汽车的数量增长适合采用巴斯扩散模型预测,以便充分考虑相关技术的发展情况。

洛特卡-沃尔泰拉模型描述两个独立具有罗吉斯蒂克增长模型的种群间的竞争关系。在产品预测中,以电动汽车发展趋势预测为例,电动汽车进入市场时与传统燃油汽车存在竞争关系。

巴斯扩散模型的提出者在对模型的后续改进中,提出了广义巴斯增长模型,加入了时变的调节因子,解决了增长模型由于初始阶段的外部扰动造成的与实际数据的偏离问题。借鉴洛特卡-沃尔泰拉模型,可以将市场竞争与置换引入巴斯扩散模型,经修改其表达式为

$$\frac{dY_1}{dt} = p \cdot [K - Y_1 - \beta Y_2] + \frac{q}{K} Y_1 \cdot [K - Y_1 - \beta Y_2] \quad (2-1)$$

其中, K 为汽车市场总空间; Y_1 为电动汽车数量; Y_2 为传统燃油车数量; β 为燃油车对电动汽车的竞争系数。式(2-1)右侧第一项为创新者数量,可以认为人群中存在先锋用户,愿意接受新技术与新产品,这部分群体的数量与增长速度,主要取决于这一技术的发展情况,即参数 p ; 第二项为洛特卡-沃尔泰拉模型,参数 q 为内部因子,描述考虑市场空间和竞争的电动汽车跟随购买者数量。

2.1.2 考虑技术演进与竞争的预测模型

1. 技术演进与竞争在预测模型中的表现形式

对汽车保有量做中长期预测,应考虑报废情况和车辆的置换购买情况。自2013年起,中国政府取消了私家车的强制报废年限,转而通过年检制度引导使用与报废。私家车在购买后的前10年只需要检验两次,超过10年后,这一频率增加到每年一次,超过15年后调整为半年一次。2022年政策进一步优化,10年以上车龄的汽车检验频率均改为一年一次。在巴斯扩散模型中, Y 描述某类型汽车在第 t 年的实际保有量, SS 为同年车辆报废数,其表达式为

$$Y(t) = Y(t-1) + \frac{dY}{dt} \Big|_{Y(t-1)} - SS(t) \quad (2-2)$$

以上海市为例,小汽车平均使用寿命为14.05年。面向较长时间尺度,还应考虑再次更换车时的选择情况。韦布尔概率密度函数(Weibull Probability Density Function, WPDF)是一种随机变量分布,体现了产品在自然衰减情况下的磨损剩

余,可用于车辆报废量预测。对于车龄 t 年的汽车报废率可采用韦布尔累计概率分布描述,其表达式为

$$SS(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (2-3)$$

其中, T 为时间参数; b 为形状参数。第 t 年报废汽车数量 $SQ(t)$ 为此前各年度增长汽车数与至本年度报废率的乘积的和,最终巴斯扩散模型修正后的表达式为

$$\frac{dY_1}{dt} = a[K + (SQ_1 + \beta SQ_2) - (Y_1 + \beta Y_2)] + \frac{b}{K}(Y_1 - SQ_1) \cdot [K + (SQ_1 + \beta SQ_2) - (Y_1 + \beta Y_2)] \quad (2-4)$$

经典的罗吉斯蒂克模型与巴斯扩散模型都是三参数模型,其中环境最大容量(市场空间) K 是固定值,其与现有种群的差值可用于描述环境压力。这一定义来自巴斯扩散模型最初的建模基础,即两个种群共用同一个生长环境空间,而该空间容量固定且与外部不存在交换。用于新产品中长期进入市场建模时,应对市场空间参数进行修正,汽车保有量预测中应考虑人口与经济发展因素,即对于某市场区域电动汽车增长态势建模时,汽车市场总量的表达式为

$$\text{汽车市场总量} = \text{人口数} \times \text{目标人均汽车保有量} \quad (2-5)$$

世界范围内,核心都市区始终对人口呈现正向吸引作用,考虑到城市面积和市政服务水平,人口数量主要受政策调控影响,这一点在中国更加显著。人均汽车保有量受收入水平、能源结构、工业化水平和消费理念等因素的影响,根据统计数据,目前在人口超过 1000 万的国家里,人均汽车保有量最多的是美国,2017 年其人均汽车保有量达到了 1.88 辆。对于中国城镇人口,2019 年人均汽车保有量为 0.432 辆。对于后发国家,可采用领先国家的历史数据进行类比。

2. 城市电动汽车保有量中长期预测结果——以中国上海市为例

上海市是电动汽车推广的示范城市,正努力打造具有全球影响力的新能源汽车发展高地,电动汽车保有量和新增速度持续领跑全国。以上海市为例,可以使用中长期发展预测方法对城市电动汽车保有量进行预测和验证,并为今后的城市发展规划提供参考。

上海市政府积极响应国家的政策指引,出台了一系列举措鼓励电动汽车发展。其主要包含以下几点。一是购车补贴政策。自 2012 年起,在上海市购买一辆插电混合新能源汽车可获 3 万元补助,而购买纯电动汽车则能获得高达 4 万元的补助。二是牌照政策。上海作为超一线城市,自 2003 年起,出于交通容量限制考虑,实



行车牌拍卖制度, 限额发放机动车牌照, 以拍卖方式交易, 拍卖价格在 8 万~20 万元不等。因此, 沪牌是稀有资源, 除需要耗费额外不菲的金钱外, 也需要耗费时间和精力才能够获得。而购买新能源汽车可以免费上专用牌照, 这对于意向购车者具有极大的吸引力。

在上述举措的影响下, 截至 2021 年年底, 上海市新能源汽车保有量达到 54 万辆, 新能源汽车已占本市汽车总量的 9.56%, 远远领先于全国 2.6% 的新能源汽车渗透率。同时, 数据增长表现得更为明显, 2021 年度新增新能源汽车占比达到年度新增汽车总量的 68%。其中, 纯电动汽车保有量达 28 万辆, 占新能源汽车总量的 51.85%。

按车辆用途来看, 随着上海新能源汽车市场车型的不断丰富, 私人车主的选择也逐渐丰富, 私人电动汽车比例逐年提高, 累计占比达到 71%; 新能源出租车数量增长显著, 纯电动出租车约 1.6 万辆, 较 2020 年增长了 102%; 新能源地面公交车约 1.4 万辆。

在上海, 电动汽车 2010 年前后进入私家车应用领域, 可采用 2010—2020 年的数据建模。在改进的巴斯扩散模型中, 利用电动汽车年增量的历史数据和市场空间修正系数, 确定外部因子 p 为 0.06, 内部因子 q 为 0.72。

进一步拓展预测中, 应考虑上海的城市规划、经济社会发展与汽车牌照政策。在 2020—2050 年的中长期预测中, 可进行以下分阶段分析。

(1) 21 世纪初是市场发展的起步期, 在此前, 电动汽车在私家车领域的销售依赖于技术创新和政策支持, 竞争力较弱。

(2) 2020—2035 年, 是电动汽车发展的爬坡期, 电动汽车市场空间拓展的驱动力从居民人口增长和经济发展转变为人均汽车保有量的上升, 表现为人口增长减速, 但人均 GDP 保持快速增长, 电动汽车的市场竞争力超过燃油汽车。

(3) 2035 年以后, 电动汽车发展进入成熟期。随着人均 GDP 达到一定水平, 私人汽车保有量会出现饱和情况, 在居民人口相对稳定的情况下, 电动汽车数量也将进入相对恒定的阶段, 燃油汽车将退出市场。汽车报废与重复购买成为新增销售的主要动力。

图 2-1 所示为 2020—2050 年上海市私家电动汽车规模预测结果, 其中 2020 年前为历史数据。考虑与燃油车的技术竞争和车辆报废及重新购买, 2020 年以后, 电动汽车规模呈快速增长趋势。在 2030 年前后, 电动汽车有望取代燃油汽车成为私家车保有量中的多数。从预测结果来看, 电动汽车届时将在新销售汽车市场中

占据主导地位，而燃油汽车预计将逐步退出私家车舞台。至 2040 年，经过约 20 年的年复合增长率为 17.7% 的快速增长，私家电动汽车规模将达到 899 万辆。2040 年以后，随着城市进入常住人口与市政建设趋于稳定的高度发展阶段，电动汽车规模也将进入稳定期。

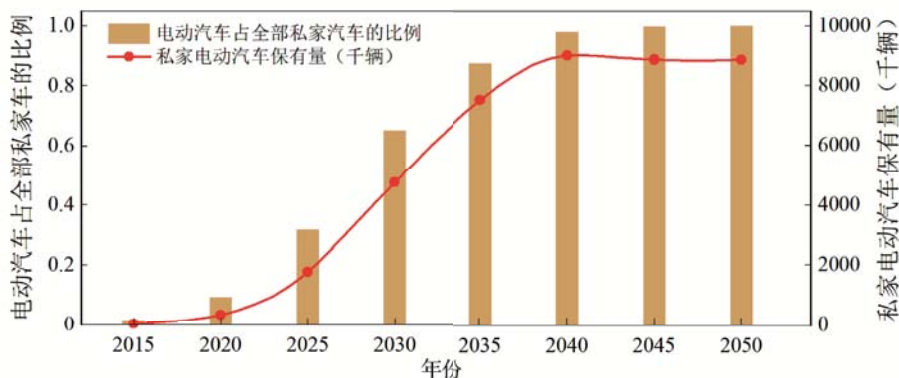


图 2-1 2020—2050 年上海市私家电动汽车规模预测结果

尽管上海有一些区域性特点，例如，对常住人口规模和新增燃油汽车数量的行政性调控，但是这一模型或部分阶段的预测结果也可以作为其他城市相似研究与规划的参照基准。随着 21 世纪中叶全球环境目标的临近，全电气化的城市交通模式有望重构城市电力—交通—社会系统的全景。对于私家车领域全面电动化后的后增长时代，饱和点之后的市场格局和新兴技术的影响需要进一步挖掘，更长期的预测需要在考虑上述因素的基础上构建新模型。

2.1.3 城市电动汽车保有量预测模型的不确定性分析方法

1. 影响因素分析

对于上海市私家电动汽车保有量的中长期预测，基于积极稳健的推广政策作为基础，并考虑了电动汽车牌照政策和燃油汽车的销售禁令。在预测模型中，电动汽车数量增长的影响因素可以归纳为环境因素(客观因素)和政策因素(主观因素)，如表 2-2 所示。

对于环境因素，表现为模型中的参数及取值。通过改变内部、外部因子 q 和 p 的取值，可以设定电动汽车数量按照不同速率增长， q 或 p 数值越大，增长速率越快。电动汽车对于燃油汽车的技术竞争水平决定了新增汽车群体的占比和相对



增长速度。对于巴斯扩散模型，当产品数量少而市场空间大时，增长率较高。在固定市场空间 K 场景中，为了调节模型中前期增长阶段的速率，往往限制参数因子的取值，导致模型后期增长落后于实际数据。经典巴斯扩散模型的提出者在后续研究中曾指出这一问题，并提出加入调节因子的解决方案，在本模型中表示为可变的市場空间参数。

表 2-2 预测模型中电动汽车数量增长的影响因素

类 型	因 子	对应参数
环境因素	①技术扩散水平	① p 、 q
	②技术竞争水平	② β
	③市场空间	③ K
政策因素	①牌照数量配额政策	①按比例分配的牌照政策或电动汽车优先的牌照政策
	②燃油汽车禁售政策	②积极、中性、保守的禁售政策

政策因素，或称主观因素方面，包括汽车牌照数量配额政策和燃油汽车禁售政策。国际能源机构预计 2040 年可能会出现全球范围内的石油供应短缺，再加上交通部门碳排放量削减的要求，可能会在政策层面上促进电动汽车的销售和对燃油汽车的生产销售进行限制。丹麦、斯里兰卡、英国、法国、以色列和瑞典等国家制定了禁售燃油汽车的路线图，我国也在制定相关规划。对于核心都市区，车辆的增加主要来自私家车的快速普及，其增长速度也受到了交通系统承载力和环保指标的限制。世界上各大城市正在纷纷采取各种措施规范汽车总量的无序增长，包括购买限制、牌照政策、特定时间和区域内的交通限制等手段。私家车领域的燃油汽车销售禁令被视为推广电动汽车的最彻底的措施，多国政府已经宣布了相应的时间表。根据时间、力度等条件分类，可归类为积极、中性、保守政策。

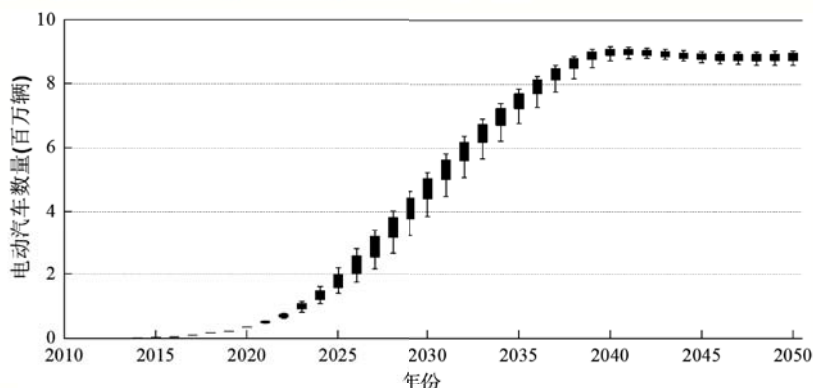
2. 城市电动汽车保有量预测不确定性分析——以中国上海市为例

尽管城市管理者可以动用政策工具箱来调节增长，但是环境因素仍然会给电动汽车规模预测带来不确定性。如图 2-2 所示，三种环境因素的影响如图 2-2(a)~图 2-2(c) 中所示，分别对应技术扩散水平、技术竞争水平和市场空间参数的影响，并可以分析其演变趋势。将图 2-1 中所示情况和影响因子取值作为标准数值，定义影响因子的不确定性的表征范围为标准数值上下浮动 20%，而其他设置则保持为标准数值。

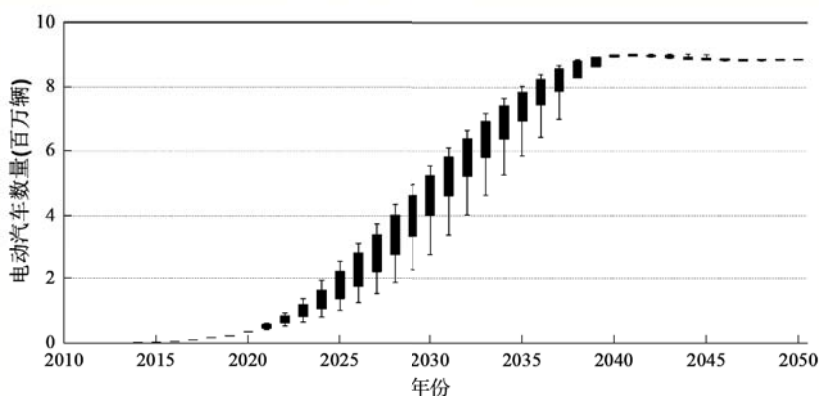
每个时间点的数值用四分位数区间表示，中部的范围框代表模拟结果中间

50%的情况。随着 p 值和 q 值的增大, 电动汽车数量的增长会加快, 而较小的燃油汽车竞争系数 β 也会加速这一过程。图 2-2(c)显示, 更大的 K 值允许稍快的增长, 而它主要决定了更大的终期数量。

在图 2-2(d)中, 对图 2-2(a)~(c)的参数进行了叠加, 不确定域上界对应的情况中, 三个影响因素均变化了 20%, 说明在更大的市场预测空间下, 扩散速度更快, 竞争力更强的电动汽车推广场景会导致数量规模的超预期增长。不确定域下界对应的情况中, K 值与标准数值相同, 但其他参数变化了 20%。与电动汽车技术发展相比, 环境承载力有更清晰的增长前景, 因为它主要取决于城市系统的建设。相比之下, 蓝线显示 K 值较小, 而其他参数作为不确定域的下限保持不变。如图 2-2 所示, 曲线保持增长趋势。这一结果验证了具有不确定性的模型的有效性, 并表明可能根据实际市场发展情况对参数进行修正。

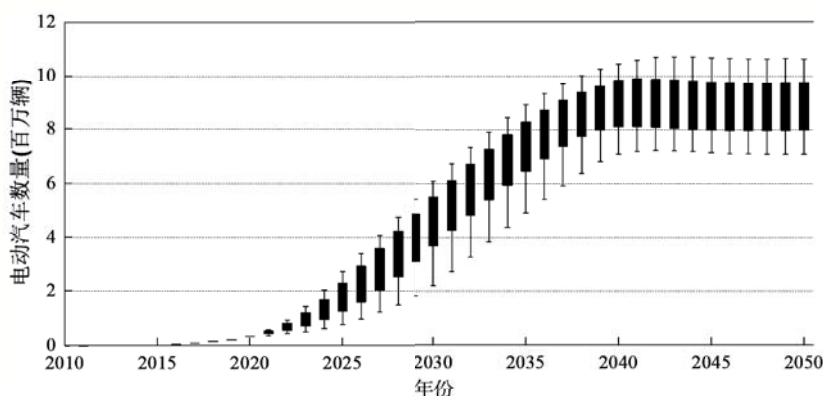


(a) 技术扩散水平影响

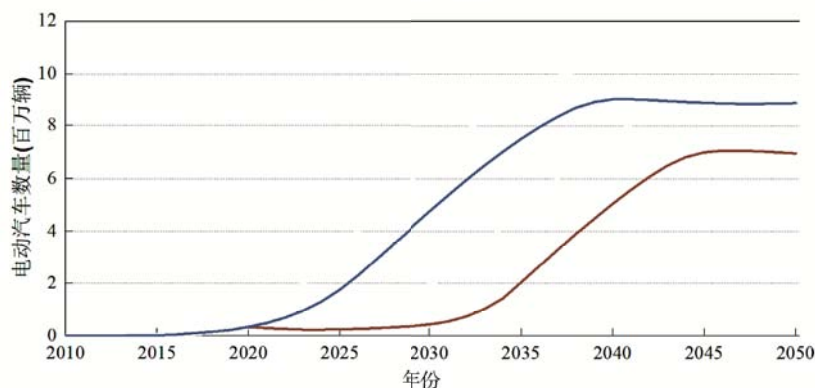


(b) 技术竞争水平影响

图 2-2 城市电动汽车保有量预测及其不确定性示意图



(c) 市场空间影响



(d) 环境因素影响

图 2-2 城市电动汽车保有量预测及其不确定性示意图(续)

从政策因素的不确定性分析，当燃油汽车的数量低于现存所有私家车总数的 0.1% 时，可以认为燃油汽车退出了私家车领域。在标准情景下，这个时间点大致在销售禁令实施后的第 13 年。上海市的执行时间预计在 2027—2033 年，预计将在不晚于 2046 年实现私家车领域的全部电气化。牌照政策方面，在规定的私家车年增长量上限政策下，根据是否优先鼓励电动汽车上牌，电动汽车总保有量预计在 2028—2031 年超过燃油汽车。

综上所述，通过研究城市电动汽车市场规模和保有量分析模型，并以中国的示范城市作为研究案例，梳理上海市电动汽车充电设施的历史发展情况和政策影响因素，展现相关预测结果和不确定性分析，为相应的城市电动汽车充电设施规划框架研究等提供基础。

2.2 城市广域范围内电动汽车充电负荷时空分布预测方法

在 2.1 节中,对城市电动汽车保有量中长期发展预测方法进行了分析和介绍。本节将介绍城市广域范围内电动汽车充电负荷时空分布的预测方法。

随着电动汽车产业的发展,电动汽车在居民家用汽车、乘用车等各类车辆中的渗透率显著提升,随之带来的电网冲击等问题也得到了学术界和工业界越来越广泛的关注。在这一背景下,城市范围内的电动汽车充电负荷时空分布的预测方法主要有以下几个方面的研究意义。

(1) 为城市范围内电动汽车充电基础设施的建设提供参考。其有助于通过与充电设施的分布及容量配置相对照,分析充电设施建设的薄弱环节,并为下一阶段的充电设施建设提供方向。

(2) 为电力系统调度提供参考。其有助于分析电动汽车充电负荷的功率规模、充电负荷热点出现的时间与地点,为电力系统调度方案的制订和应急处理提供参考;有助于发挥电动汽车的移动式储能特性,为提供电动汽车有序充电或者是对 V2G 场景下的功率调整和调度潜力评估依据。

(3) 为城市配电网建设规划提供参考。其有助于分析在电动汽车渗透率逐渐提升的背景下,充电负荷导致的电网负荷增长趋势,并判断城市配电网的薄弱之处,为配电网的扩容改造提供参考依据。

鉴于以上的重要意义,本节拟为读者提供一种具有较好的可移植性的城市广域电动汽车充电负荷时空分布预测方法,并使之具有更高的应用参考价值。

2.2.1 出行链理论

在现代城市场景中,电动汽车的使用可以分为几种类型,包括家用电动汽车、载客电动汽车、货运电动汽车和其他特殊用途的电动汽车,如邮递用途和旅游用途。在这些电动汽车中,载客电动汽车(如公交车)和载货电动汽车可能在专门的客运站或货运站进行充电;其他特殊用途的电动汽车可能在相应的充电设施充电。然而,相当比例的家用电动汽车或部分载客电动汽车(如电动出租车、电动网



约车等)不具有在私有充电站进行充电的条件。此外,由于家用及部分载客的电动汽车不像其他电动汽车那样具有周期性行驶的特点,因此,有可能在行驶过程中需要紧急充电。此类电动汽车是城市快速充电站的主要客户,因此可以认为它们具有较为相似的出行目的和特性。

由于城市快速充电站的充电负荷主要与家用电动汽车有关,因此需要对家用电动汽车行为进行研究。家用电动汽车的用途与家用内燃机汽车相类似,可以自然地假设家用电动汽车的出行特性与内燃机汽车相似。每个家庭电动汽车出行的目的地可以分为5类,家(home, H),工作(work, W),购物及外出办事(shopping and errands, SE),社交与娱乐(social and recreation, SR)及其他(other, O)。此外,对于家用电动汽车,车主的家是电动汽车定期到达的地方。因此,每辆电动汽车的行程可以被人为地以电动汽车回到家中为节点而分开。因此,家用电动汽车的行程形成封闭链,其中包括车主的家,因此这类出行链被称为基于家庭(home based, HB)的出行链。HB 出行链按包含的行程数和中途站点可分为若干类,其中包含3次或更少行程的出行链是主要的考虑对象。这是因为,一天内包含4次或4次以上行程的出行链通常包含了行程之中的中途停留,例如,车主把孩子送到学校时在学校门口的短暂停留。在类似的中途停留过程中不太可能给电动汽车充电。包含3次或更少行程的出行链可以根据行程数分为简单链(2次行程)和复杂链(3次行程),并通过中途停留地点的类别进一步划分为几种类型。出行链的类型如图2-3所示。

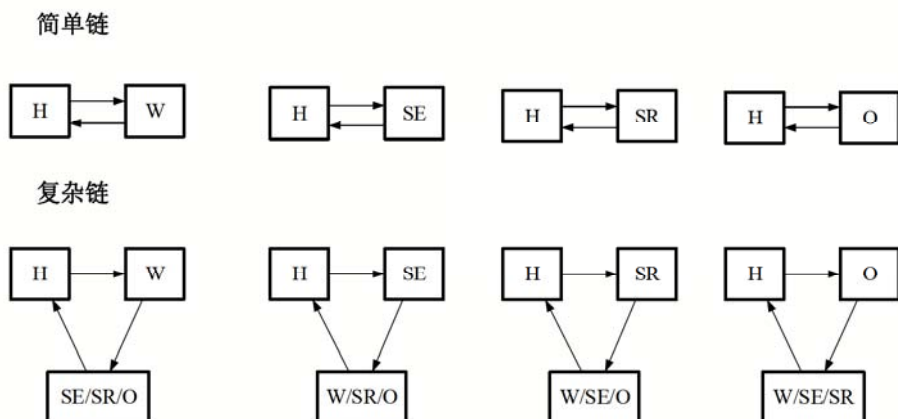


图 2-3 出行链的类型

根据16种出行链类型,电动汽车的出行模式可以分为16种出行模式。这些出行模式可以用出行链中的地点符号来标记,如H-W-H表示从家出发至工作地

点,再由工作地点回到家的出行模式。在每一类出行模式下,车辆的出行过程都由2~3段行程组成,其中每一段行程都具有出发时刻、结束时刻、持续时长、行驶距离、平均速度等多项行程参数,通过这些参数即可描述电动汽车的行为特性。

需要注意的是,由于车主的需求及路况和天气等客观因素,每次出行链的行程参数并不总是相同的,即电动汽车的行为特性具有较强的不确定性。因此,需要对城市电动汽车的行为特性进行不确定性建模。

2.2.2 出行特性统计特征分析方法

对城市电动汽车行为特性的不确定性建模需要建立在大量统计数据的基础上。对目标研究区域内的电动汽车进行出行统计得到的数据能够最大限度地反映电动汽车的行为特性。然而,所研究目标地区的发展水平、统计部门职责各不相同,且电动汽车尚处于发展阶段,单独对电动汽车开展的出行调查有一定的难度,调查所获得的数据集也可能因为公司策略或部门权限等问题不便对外公开。

由于以上种种限制因素的存在,在很多情况下,开展研究时无法获取完全符合需求的统计数据集。在此类情况下,选取一个调查规模较大、调查内容较为丰富、信息来源较为权威的典型数据集是较为合理的做法。例如,国内尚未出现对公众出行的大规模统计,因此部分研究采用了全美家庭出行调查(National Household Travel Survey, NHTS)统计数据进行分析。NHTS是由美国联邦公路管理局执行的公众出行数据统计,一般被认为是美国公众出行行为数据的最权威来源,其中2017年执行的统计(NHTS 2017)是最新的统计数据。在NHTS 2017的统计数据中,公众出行数据库包含923500条家庭出行记录,记录了每次出行的详细信息。本研究使用的主要信息包括家庭和车辆的ID、出行日期、出发时间、结束时间、持续时间、行程的长度、目的地及是否基于家庭。

以下以NHTS 2017统计数据集为例,说明对于一般的统计数据集可采用的出行特性统计特征分析方法。

对于统计数据集,可遵循以下几个步骤分析家庭电动汽车的出行链特征。

步骤1:读取当前出行记录的数据。

步骤2:当闭合出行链的所有必要数据都被记录下来时,将其添加到对应的出行链类型的数据集中。

步骤3:将数据集中各类出行链的每次行程的数据进行累加,使用核密度估



计方法进行概率密度函数拟合。

NHTS 数据分析流程如图 2-4 所示。

通过上述数据处理过程，可以获得以下与电动汽车出行链相关的概率统计结果。

(1) 每一类型的出行链中的各段行程的开始时间和结束时间的概率分布、出行时间的概率分布、出行距离的概率分布、平均速度的概率分布。

(2) 每一类型的出行链在每一个地点的中途停留时间的概率分布。

(3) 每一种出行链的比例。

由此，从 NHTS 2017 统计数据中提取了家用汽车的出行特性，得到了城市电动汽车多模式行为特性下的不确定性模型。接下来以两个特性为例，说明该模型的基本特点及该模型的合理性。

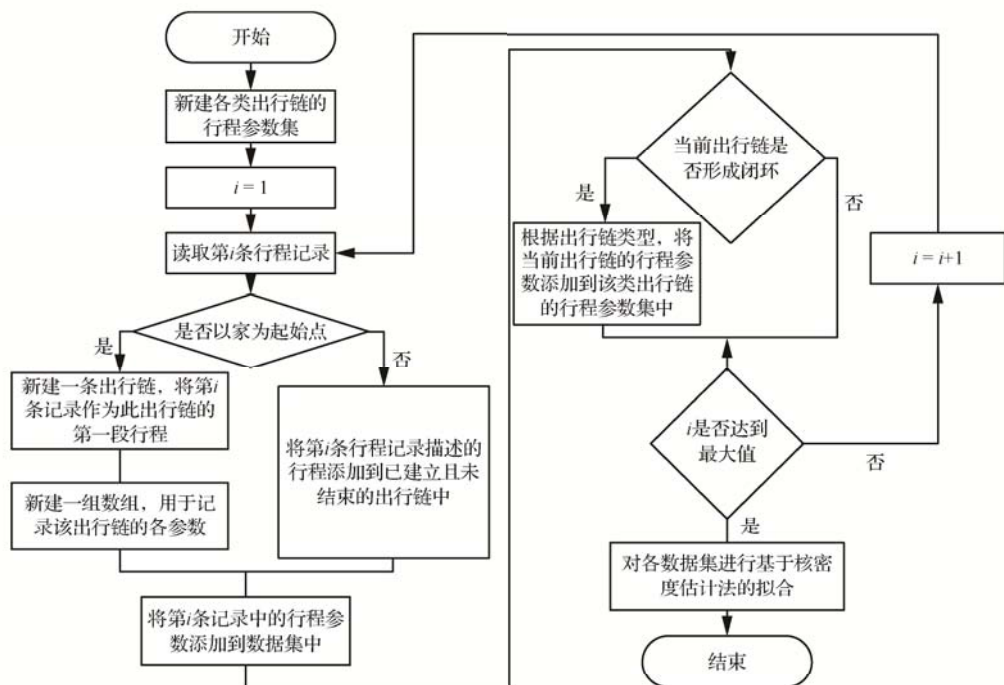


图 2-4 NHTS 数据分析流程

图 2-5 显示了 H-W-H 出行链中行程 1(H-W)结束时间直方图及拟合分布的概率密度函数。从直方图中可以看出，行程 1 的结束时间在上午 8 点左右达到了概率最大值，说明 NHTS 2017 的统计结果是符合生活经验的。但从直方图中，并不能明显地判断出行程 1 的结束时刻是否服从某个典型分布，如正态分布或韦布尔分布等。

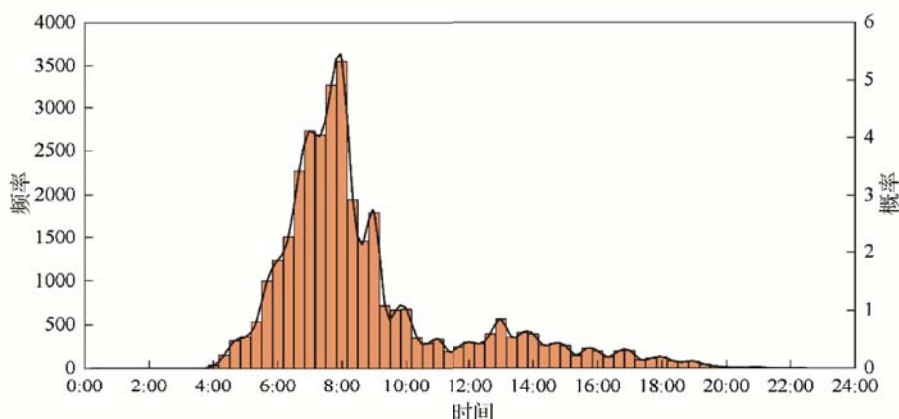


图 2-5 H-W-H 第一段行程结束时间直方图及拟合分布

为了解决这一问题，在数据拟合中可以采用核密度估计方法。核密度估计是一种非参数检验方法，它无须预设分布形式，而是能够完全根据数据本身的性质对数据进行拟合，因此能够最大限度地保留原始数据的分布特征，这也是该方法被广泛应用于数据分析的原因。核密度估计方法的定义如下。

设 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为从单变量分布中抽取的独立分布样本，给定点 x 有未知的概率密度函数 f ，若要求将函数 f 的形状，可以对 x 服从的分布的概率密度函数进行估计，其表达式为

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2-6)$$

其中， K 是非负的核函数；带宽 h 为平滑参数，一般取大于 0 的值。带下角标 h 的核称为缩放核，定义为 $K_h(x) = \frac{1}{h} \cdot K(x/h)$ 。

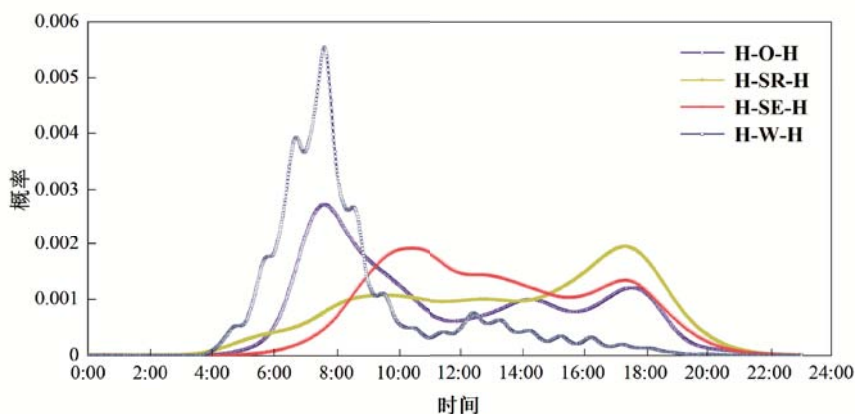
常用的核函数有：均匀核(uniform)、三角核(triangular)、双权核(biweight)、三权核(triweight)和正态核(normal)等。正态核的数学特性良好，在使用核密度估计方法拟合数据时经常使用，即 $K(x) = \phi(x)$ ，其中 $\phi(x)$ 是标准正态密度函数。

如图 2-5 所示，曲线是根据直方图中的数值进行核密度估计拟合得到的概率密度函数。从图中的结果可以看出，核密度估计在数据拟合中能够很好地反映数据本身的统计特征，而并未呈现某种典型分布的函数曲线形状。

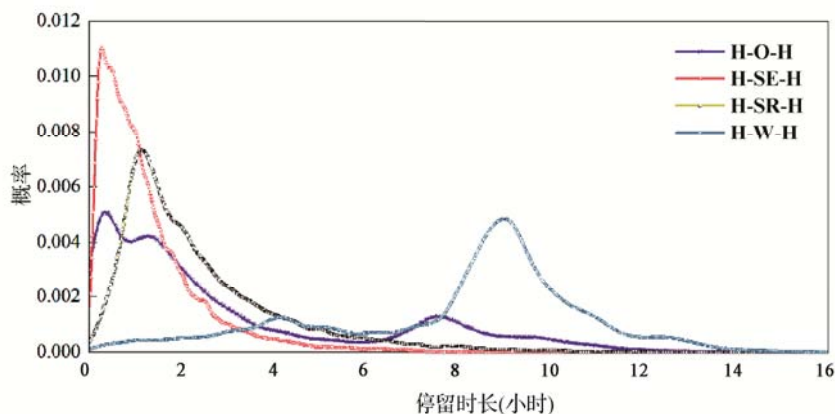
四类简单链的第一段行程结束时间和中途点停留时长的分布如图 2-6 所示。从图 2-6(a)的分布可以看出，H-W-H 出行链中电动汽车到达 W 点的概率在 6:00—9:00 明显更高；而 H-SE-H、H-SR-H、H-O-H 到达概率的峰值大约在 11:00、18:00 和 8:00 出现。



四类简单链的中途点停留时长分布如图 2-6(b)所示。图中的结果显示, H-W-H 链在 W 点停留时长集中分布在 8~10h, 而其他三类链的中途停留时长相对较短, 通常不超过 4h。



(a) 四类简单链的第一段行程结束时间分布



(b) 四类简单链的中途点停留时长分布

图 2-6 四类简单链的第一段行程结束时间和中途点停留时长的分布

这两类参数的统计学特征结果表明, 每次行程的结束时间和停留时长与出行链的类型之间具有明显的相关性。与此类似, 其他的行程参数也与出行链类型, 即行为模式之间具有明显的相关性, 这也说明了引入出行链理论来分析电动汽车行为模式的合理性和必要性。

2.2.3 基于电动汽车行为模型的广域范围充电需求建模

在电动汽车行为模型的基础上, 可以采用蒙特卡罗(monte carlo)模拟方法, 结