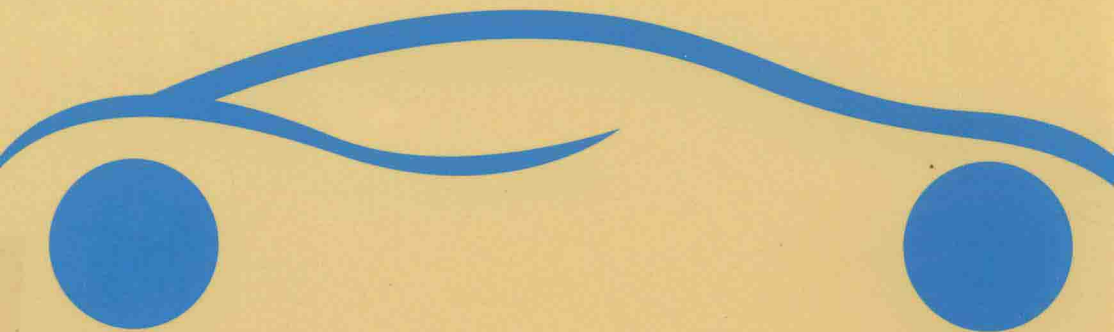




Electric Vehicle's Charging and
Discharging Model and Strategy Optimization

电动汽车充放电模式 及策略优化

饶饶 张兴平 ◎著



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

(71473083) 研究成果



Electric Vehicle's Charging and
Discharging Model and Strategy Optimization

电动汽车充放电模式 及策略优化

饶饶 张兴平 ©著



中国经济出版社
CHINA ECONOMIC PUBLISHING HOUSE

北京

图书在版编目 (CIP) 数据

电动汽车充放电模式及策略优化 / 饶饶, 张兴平著.

北京: 中国经济出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-5136-4856-1

I. ①电… II. ①饶…②张… III. ①电动汽车—充放电—研究 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 230076 号

责任编辑 赵静宜

责任印制 巢新强

封面设计 九品轩

出版发行 中国经济出版社

印刷者 北京建宏印刷有限公司

经销者 各地新华书店

开本 710mm×1000mm 1/16

印张 13.5

字数 179 千字

版次 2018 年 1 月第 1 版

印次 2018 年 1 月第 1 次

定价 56.00 元

广告经营许可证 京西工商广字第 8179 号

中国经济出版社 网址 www.economyph.com 社址 北京市西城区百万庄北街 3 号 邮编 100037

本 版 图 书 如 存 在 印 装 质 量 问 题, 请 与 本 社 发 行 中 心 联 系 调 换 (联 系 电 话: 010-68330607)

版权所有 盗版必究 (举报电话: 010-68355416 010-68319282)

国家版权局反盗版举报中心 (举报电话: 12390)

服务热线: 010-88386794

前 言

电动汽车由于其节能减排效益成为了未来交通端的重要转型方向。电动汽车的充电行为主要受用户主导，每一辆电动汽车接入电网后都会形成随机的用电负荷，由于我国电源结构以燃煤为主，随机的充电行为会造成交通端降低的碳排放转移到发电端，从而使电动汽车发展的节能减排初衷失去意义。基于此，发展电动汽车需着重研究电动汽车的充电行为。此外，在电动汽车充电过程中涉及到多个利益主体，包括发电端、电网端、基础设施运营商及电动汽车用户。为了使用户优化充电行为，必须从利益链的角度协调各方利益，从而形成外界激励以此对用户的充电行为进行引导。本书基于不同电动汽车的充电模式，通过深入挖掘数据获得电动汽车充放电优化策略及形成有序充放电的利益链协调机制。其中，研究数据均是通过实际调研获得的针对多个城市电动出租车实际运营的数据。考虑到数据特征，本书主要针对电动出租车的充电行为及充放电优化策略展开研究。研究的主要内容包括以下几个部分：

首先，对电动汽车充电行为的研究是获得有序充电优化策略的基础。通过实地调研，以电动出租车运行数据为基础，运用高斯混合分布模型、贝叶斯信息准则及蒙特卡洛方法获得电动出租车充电的一般规律模型。进一步考虑电动汽车保有量、充电次数、充电功率、充电能效等因素，构建了电动汽车充电需求模型，从而确定实际充电负荷。为剖析电动汽车充电的实际效益，构建了电网运行效益分析模型及碳减排效益分析模型，以探究电动汽车所能实现的综合效益。

其次，充电行为优化策略是实现电动汽车节能减排效益的前提。基于此，分别就直充及换电两种模式对电动汽车的充电行为进行了优化。在直充模式下，考虑多个利益方视角，分别构建充电优化模型，从而获得多个充电负荷优化策略。为了对比各优化策略实现的节能减排效果，进一步从发电方角度以燃煤成本最低为目标，构建了节能调度优化模型。在换电模式下，以避免负荷高峰段、避免电动出租车运营密集期及避免电动出租车车主休息期为原则，对换电站的充电负荷进行了优化，提出了有序换电模式。通过构建电网端效益分析模型，验证了有序换电模式可提高电网运行效益。考虑风电入网、火电机组运行约束、输电约束、换电站运营约束、充放电约束，构建了发电端经济调度模型，对不同电动汽车规模下换电站执行充放电的节能减排效益进行分析。

再次，利益链异质主体间能否实现共赢与电动汽车有序充放电的实现息息相关，任意一方的经济性缺失都将阻碍电动汽车充电市场的健康发展。其中，换电模式的经济性一直是制约其规模发展的瓶颈。虽然相较于直充模式，换电模式更适合电动出租车的供能，可以实现对电池的统一管理，更易于对充放电活动有序操控，且通过充放电所能实现的综合效益更为明显。但其运营商前期投入较大，利益链难以实现平衡。基于需求端，挖掘潜在运营商及运营模式，从运营商视角构建投资成本分析模型，从用户视角构建充电费用分析模型，分别获得运营商开展换电服务的边际收益条件及用户接受换电服务的边际成本条件。通过两者的平衡，研判各运营模式的经济性。此外，还对多个影响换电服务的关键因素进行了敏感性分析。

最后，利益链实现内在协调是电动汽车有序充放电的机制保障。在直充模式下，基于序贯博弈理念，构建了各参与方的利益优化模型，通过电价联动实现了利益链的协调，并求解出协调时的相应电价值。在换电模式下，电网与运营商之间构建了契约机制，运营商与用户之间遵循“委托-

代理”关系，利用分时换电服务费来实现利益链协调，通过设定多个充放电价及换电峰谷服务价以探寻能使利益链得到协调的平衡点。

通过数据调研、模型构建、软件测算、结果归纳获得了针对电动汽车充换电行为、充换电优化策略、利益链利益最大化及利益链均衡等相关内容的宝贵成果。希望本书的研究方法及测算结果能成为与志同道合的学者们进行学术交流的契机，本书所得结论能为政府部门制定电动汽车发展政策提供些许参考。由于笔者水平有限，书中难免有不足之处，诚望各位读者提出宝贵建议。

本研究成果得到了国家自然科学基金项目（71473083）的资助，作者对资助机构表示衷心的感谢。同时，本书引用了大量前人的研究成果，作者在此表示感谢！

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.1.1 我国发展电动汽车的必要性	1
1.1.2 我国电动汽车发展现状	4
1.1.3 研究意义	6
1.2 国内外研究动态	8
1.2.1 电动汽车充放电对电力系统影响	8
1.2.2 电动汽车有序充放电模式	10
1.2.3 电动汽车与清洁能源协同优化	12
1.2.4 电动汽车充放电电价机制	18
1.2.5 电动汽车充放电运营模式	19
1.2.6 电动汽车利益主体协调优化	20
1.3 主要内容和创新点	22
1.3.1 主要内容	22
1.3.2 创新点	27
第2章 电动汽车充电行为及规律拟合模型	30
2.1 电动汽车充电行为拟合思路	30

电动汽车充放电模式及策略优化

2.1.1	充电行为数据获取路径	30
2.1.2	充电规律模型构建思路	32
2.2	电动汽车充电行为分析	35
2.2.1	原始数据处理	35
2.2.2	单因素分析	42
2.2.3	多因素综合分析	44
2.3	电动汽车充电一般规律模型及校验	47
2.3.1	充电起始时间概率分布模型	47
2.3.2	充电历时概率分布模型	54
2.3.3	充电行为拟合模型校验	58
2.4	本章小结	61
第3章 电动汽车充电需求及效益分析模型		63
3.1	电动汽车充电需求分析模型	64
3.2	电动汽车充电效益分析模型	67
3.2.1	电网运行效益分析模型	67
3.2.2	碳减排效益分析模型	67
3.3	电动汽车充电效益实例分析	69
3.3.1	基础数据	69
3.3.2	电网运行效益分析结果	71
3.3.3	碳减排效益分析结果	78
3.4	本章小结	79
第4章 直充模式下电动汽车充电优化及效益分析		81
4.1	充电优化路线	81

4.2 考虑不同利益群体的充电优化模型	82
4.2.1 电网视角下充电优化模型	82
4.2.2 运营商视角下充电优化模型	88
4.2.3 用户视角下充电优化模型	91
4.3 不同充电策略对发电方的影响分析	93
4.3.1 不同充电策略对比	93
4.3.2 发电侧节能发电调度优化模型	94
4.3.3 案例分析	98
4.4 本章小结	102
 第5章 换电模式下电动汽车充放电优化及效益分析	104
5.1 换电模式概况	104
5.2 换电模式下充电负荷优化思路	106
5.2.1 换电模式下充电负荷分布	106
5.2.2 有序换电模式构建	108
5.3 有序换电模式对电网端效益分析模型	110
5.3.1 电网运行效益分析指标	110
5.3.2 案例分析	111
5.4 有序换电模式对发电端效益分析模型	112
5.4.1 发电侧经济调度模型	112
5.4.2 案例分析	116
5.5 本章小结	127
 第6章 基于需求端的换电模式运营经济性分析模型	129
6.1 直充模式与换电模式对比分析	129

6.1.1	换电模式竞争优势分析	129
6.1.2	换电模式发展瓶颈分析	131
6.2	运营商经济性分析模型	132
6.2.1	换电服务潜在运营模式	132
6.2.2	运营商投资成本分析模型	133
6.2.3	运营商边际收益分析模型	137
6.3	用户经济性分析模型	138
6.3.1	用户充电费用分析模型	138
6.3.2	用户边际成本分析模型	141
6.4	实例分析	142
6.4.1	基础数据	142
6.4.2	运营模式利益对比结果	145
6.4.3	影响因素敏感性分析	147
6.5	本章小结	153
第7章 促进有序充放电的利益链协调研究		156
7.1	概述	156
7.1.1	利益链联结框架	156
7.1.2	利益方角色定位	158
7.1.3	协调优化路线	159
7.2	直充模式下各参与方利益优化模型	160
7.2.1	发电方利益优化模型	160
7.2.2	电网方利益优化模型	163
7.2.3	用户端利益优化模型	165
7.2.4	案例分析	167

7.3 换电模式下各参与方利益优化模型	173
7.3.1 电网方利益优化模型	174
7.3.2 充换电运营商利益优化模型	175
7.3.3 用户端利益优化模型	176
7.3.4 案例分析	177
7.4 本章小结	184
参考文献	186
重要术语索引表	202

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 我国发展电动汽车的必要性

近年来,作为中国经济增长动力之一的传统燃油汽车产业引起了人们对能源消耗及环境污染问题的担忧。交通运输端是造成能源消耗及碳排放的主要领域之一。对于发达国家,其交通行业的能耗占到能源总消费的25%~30%,其CO₂排放量占总排放量的1/3左右(施晓清,2013)。我国预计在2008—2030年间,汽车保有量将以12.8%的速度增长,由此导致的CO₂排放量将以1.2%的比率增长(刘建翠,2011)。燃油汽车的快速发展使石油消耗量显著增长,且频繁出现的雾霾现象使人们更重视大气环保,而汽车尾气被发现是城市PM2.5的主要来源之一。自1993年开始我国成为石油净进口国,并且自上世纪90年代初期,我国的石油消费量开始大幅度增长,交通领域的石油消费量也显著提升。如图1-1所示,2005年我国交通领域的石油消费量占国内石油消费总量的32.9%,这一数值到2014年攀升到37.7%。据国际能源署预测,到2030年我国石油消费量将达8.08亿吨,交通端的消费量将占43%,我国石油对外依存度将达80%。高占比的石油对外依存度将对我国的

能源安全及经济发展产生巨大威胁。

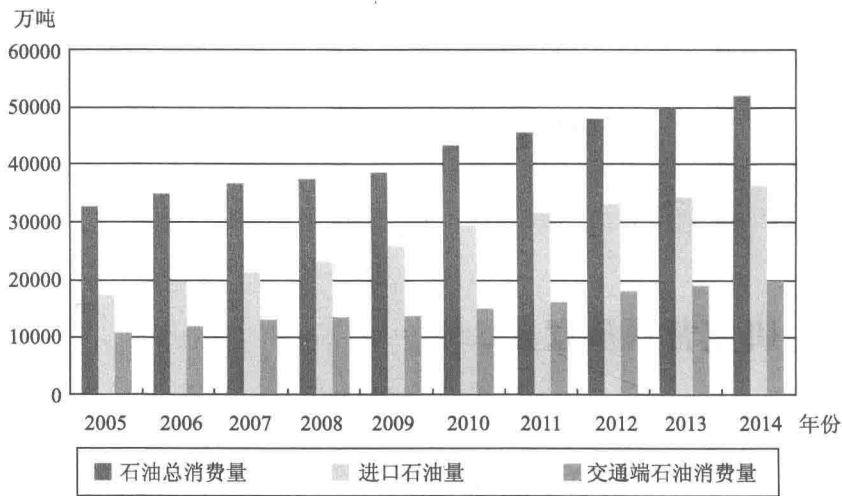


图 1-1 我国石油消费量变化情况

来源：国家统计局

我国是世界人口最多的国家，近年来我国推动的城市化进程使得越来越多的农村人口涌入城市，并使几个资源较优的城市更为拥挤，包括北京、上海、广州、深圳等。由表 1-1 可得，近年来，人口在 20 万至 50 万的城市正在逐渐减少，而人口在 200 万至 400 万的城市数量却有所上升，尤其是 2014 年出现了大中型城市人口的明显上升。2015 年 100 万人口及以上城市较 10 年前增长了 25.6%，而 100 万人口以下城市减少了 12.4%。此外，我国城市人口自 2005 年开始后 11 年间增长了 37.2%，农村人口下降了 19.0%（图 1-2）。城市人口的上升必然带来交通领域内机动车的数量上涨，由图 1-3 可得，同一时期，我国几个典型大型城市的私家车总量在 15 年内均扩大 10 倍或以上，并且仍保持着快速增长。

表 1-1 城市人口数量变化

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
超过 400 万	13	13	13	14	14	14	14	14	17	15
200-400 万	24	26	28	28	30	31	31	33	35	38
100-200 万	80	79	81	82	81	82	82	86	91	94
50-100 万	106	111	110	110	109	108	108	103	98	92
20-50 万	59	55	51	51	49	49	50	52	47	49
低于 20 万	4	3	4	2	4	4	4	2	4	7
合计	286	287	287	287	287	288	289	290	292	295

来源：国家统计局

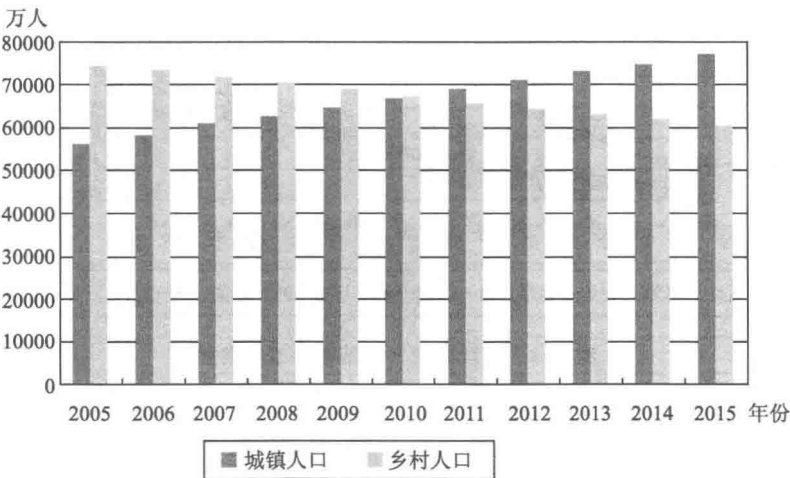


图 1-2 我国城市及农村人口变化

来源：国家统计局

传统燃油车是造成温室气体排放及空气污染的主要源头之一。近年来，越来越频繁的雾霾现象对人体健康造成严重威胁。据调查，重工业、煤炭燃烧及燃油车是造成雾霾现象的三大原因。所以，在环境污染问题面前，我国政府大力推动产业结构改革、提高可再生能源利用、推动低碳交通的发展势在必行。

面对日益严峻的能源危机、加快发展的城市化进程及加剧恶化的自

然环境，电动汽车是未来交通端发展的必然趋势。中国“节能与新能源汽车产业发展规划（2012—2020 年）”确定节能与新能源汽车已成为国际汽车产业的发展方向，未来 10 年将迎来全球汽车产业转型升级的重要战略机遇期，许多发达国家已将电动汽车发展作为国家战略之一。

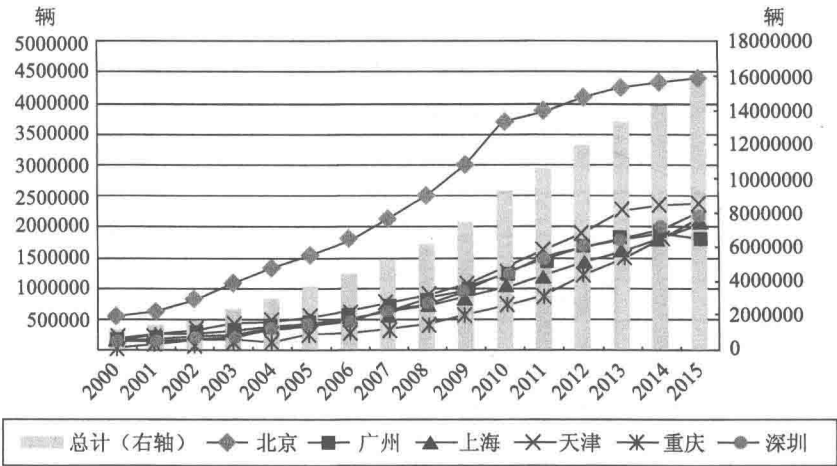


图 1-3 我国典型大型城市私家车数量

1.1.2 我国电动汽车发展现状

2009 年 3 月国务院下发了《汽车产业调整和振兴规划》，提出在此以后的三年形成 50 万辆纯电动、充电式混合动力和普通型混合动力等新能源汽车产能，新能源汽车销量占乘用车销售总量的 5% 左右。然而，根据中国汽车产业发展协会公布的数据（图 1-4），2013 年前 9 月每月新能源汽车平均产量仅为 2482 辆。考虑到技术升级及企业发展，可推测规划期的三年（2010—2012 年）最大产能大约为 10 万辆，与 50

万辆的发展目标尚有较大差距^①。

2009年,我国科技部、财政部、发改委、工业和信息化部共同启动“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”(简称“十城千辆工程”),通过提供财政补贴,计划用3年左右的时间,每年发展10个城市,每个城市推出1000辆新能源汽车开展示范运行,涉及这些大中城市的公交、出租、公务、市政、邮政等领域,力争使全国新能源汽车的运营规模到2012年占到汽车市场份额的10%。然而根据工信部统计数据,截至2011年7月,25个示范城市年均共销售10000辆新能源汽车,其中10%的新能源汽车为私人购买,其余大部分作为政府公务用车或用于市政公共服务用车。总体而言,“十城千辆工程”的实施效果与目标存在着较大差距。

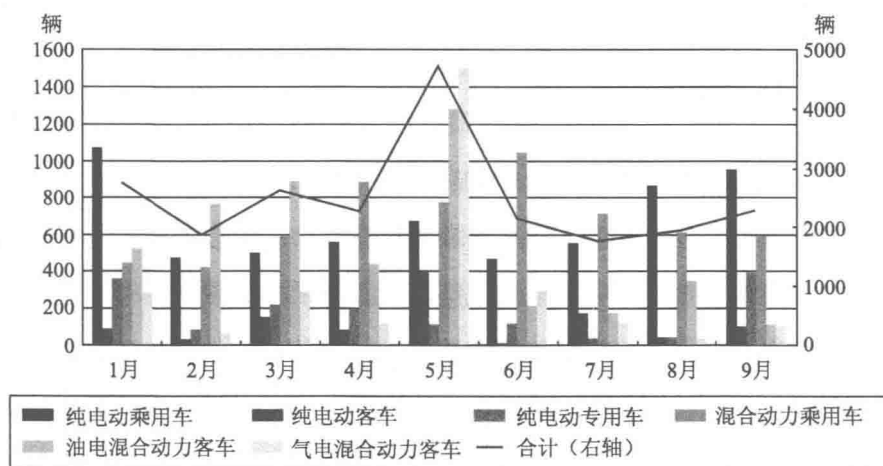


图 1-4 2013 年新能源汽车月产量

自2009年以来,我国电动汽车总体发展比较缓慢,制定的发展目

^① Zhang Xingping, Rao Rao, Xie Jian, Ling Yanni. The Current Dilemma and Future Path of China's Electric Vehicles [J]. Sustainability, 2014, 6 (3): 1567-1593.

标未能实现,电动汽车对用户的吸引力受到质疑。此外,电动汽车规模发展后所能实现的节能减排效力、对供电系统的影响等同样受到人们的关注。电动汽车的减排效力受供能端及运行过程的综合作用,由于我国电源结构以燃煤为主,现阶段电动汽车供能多为火电输送,其在交通端的减排实质转移到了发电端,节能效果锐减。此外,电动汽车充电对电网蕴含消极影响,用户的随机充电行为将可能造成负荷峰谷差加剧,这样不仅不能达到节能减排的效果,而且给电网的安全运行带来了消极作用。更突出的是,电动汽车具有显著的规模效益,目前规模发展的局面尚未打开,因此其绿色效应及电力系统辅助服务功能都受到了限制。虽然电动汽车技术尚未成熟是一个重要的原因,但更重要的是缺少促进电动汽车合理发展的健全的电动汽车市场以及与之相关的多主体合作运营模式和协调机制。

1.1.3 研究意义

要实现电动汽车的节能减排效应和对电网的辅助服务功能,必须规范电动汽车的充放电行为,使得电动汽车有序发展、有序充电。在电动汽车规模发展的链条中,发电商、电网、基础设施运营商、电动汽车用户等主要利益群体的行为直接影响着电动汽车的市场规模及潜在的节能减排效益。因此,以实际电动汽车的充电为着眼点,促使电动汽车市场发挥规模效益并探索多利益群体的协同互动机制,这对于推动电动汽车市场持续、有序发展具有基础性的作用。

通过本研究,一方面可以从学理上解决以下学术问题:

第一,归纳电动汽车充电行为的一般规律模型。电动汽车充电行为对于其效益的发挥至关重要,同时也影响电动汽车市场的建设。目前,以电动汽车充电行为为分析对象的研究较少,本文拟基于电动汽车实际