

# 清洁能源发展场景下电动汽车入网对区域碳排放的系统动力学建模与分析

周椿奇<sup>1</sup>, 向月<sup>1</sup>, 岑炳成<sup>2</sup>, 陈哲<sup>2</sup>, 童话<sup>1</sup>, 赵黄江<sup>1</sup>, 刘友波<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:**在“碳达峰、碳中和”发展背景下,电动汽车的推广为实现双碳目标提供有力的支撑。为研究电动汽车对碳排放的影响,首先分析电动汽车规模、区域能源构成及车网互动技术与碳排放之间的耦合关系;然后根据清洁能源发展规律构建区域清洁能源发展路径;最后基于系统动力学原理建立考虑清洁化能源变化下,电动汽车入网对区域碳排放演化的动力学反馈模型。最后,以中国西南某城市的数据为例进行动力学演化仿真,其中以电动汽车的发展规模及清洁能源的发展路径为主要变量,分析多种场景下电动汽车入网对区域碳排放的影响。此外,还通过灵敏度试验验证电动汽车入网具有一定的碳减排效益。上述仿真结果表明,清洁能源的发展对碳减排的影响最显著,且电动汽车车网互动技术具有巨大的碳减排潜力。

**关键词:**碳中和碳达峰;电动汽车规模;区域能源网构成;车网互动技术;碳排放;系统动力学

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.005 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2021)03-0036-10

## System dynamics modeling and analysis of regional carbon emission by electric vehicles development under the evolution of clean energy development

ZHOU Chunqi<sup>1</sup>, XIANG Yue<sup>1</sup>, CEN Bingcheng<sup>2</sup>, CHEN Zhe<sup>2</sup>, TONG Hua<sup>1</sup>,  
ZHAO Huangjiang<sup>1</sup>, LIU Youbo<sup>1</sup>, LIU Junyong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211103, China)

**Abstract:** In the context of the development of carbon peak and carbon neutral, the promotion of electric vehicles (EVs) provides a strong support for the realization of low-carbon goals. For investigating the impact of EVs on the carbon emission, the paper firstly, analyzes the coupling relationship between the scale of EVs, regional energy composition, Vehicle-to-Grid (V2G) technology and carbon emissions. Secondly, the district energy development path is constructed according to the development law of the clean energy. Finally, based on the principle of system dynamics, a dynamic feedback model of the evolution of the regional carbon emission trajectory with the integration of V2G under the development of the clean energy is established. Finally, the paper takes the data of a city in southwest China as an example to conduct dynamic evolution simulation, in which the development scale of EVs and the development path of the clean energy are taken as main variables to analyze the impact of EVs on regional carbon emissions under various scenarios. Besides, this paper also verifies the carbon emission reduction benefit of EVs through the sensitivity test. Simulation results indicate that the development of the clean energy has the most significant impact on the carbon emission reduction, and the V2G technology has huge benefits on the carbon emission reduction.

**Key words:** carbon peak and carbon neutral; scale of electric vehicles; regional clean energy path; vehicle to grid; carbon emission; dynamic system

在中国大力推动新能源汽车发展的背景下,电动汽车(electric vehicle, EV)替代传统燃油车(commercial vehicle, CV)的规模正逐步扩大,为实现“碳达峰、碳中和”的双碳目标提供了强有力的支撑<sup>[1-2]</sup>。另一方面,电动汽车车网互动技术(vehicle to grid, V2G)的发展以及清洁能源的渗透率稳步提升进一步为碳减排目标提供了保障<sup>[3-4]</sup>。因此,深入挖掘电动汽车发展趋势、区域能源网络结构、车网互动潜力以及相关政策等多因素,对推动碳减排和建设智能清洁能源具有深远的意义。

现阶段国内外学者对 EV 与电网的交互影响进行了大量的探索,如 EV 的负荷预测、充电站桩规划方案及充电电价定价机制等相关研究<sup>[5-8]</sup>,而这些文献均需以城市 EV 规模作为其研究基石,由此有必要对 EV 的规模发展趋势进行探索。文献[9]利用 Bass 扩散模型对 EV 的保有量发展趋势进行了模拟;文献[10]分析了 EV 产业发展过程中的阻碍因素,研究了影响 EV 用户购买决策的内外因素;文献[11]基于多代理技术,通过消费者行为学理论,建立了 EV 用户的购车模型,从微观角度分析了用户个体对 EV 规模发展的影响。以上文献主要通过数学方法对 EV 的发展进行了预测,但限于未曾考虑碳减排与 EV 规模演化之间的相互影响关系,因此无法定量分析出 EV 对碳减排目标的贡献程度。此外,在相关政策的推动下,区域能源网中能源清洁化的趋势愈发显著,EV 可通过消纳清洁能源从而减少碳排放。关于电力系统与碳排放之间的关系,国内有学者曾提出碳排放流理论,对电力系统的碳排放进行了基础探究,文献[12]基于碳排放流理论分析了电力系统运行中的碳排放量;文献[13]关注碳排放流方向,对电能来源进行溯源,以此进一步将碳流理论推广至生产实际中,对系统中碳排放的流向进行跟踪,为碳流的计算提供依据。

为了更深层次地挖掘 EV 作为需求响应资源在能源网中对碳减排的贡献意义,该文进一步考虑了车网互动模式下电动汽车带来的碳减排环境效益。在电动汽车与电网互动方面,大量的研究主要探究 V2G 提供的经济效益。文献[14]对比了 EV 作为需求响应资源参与调频服务与备用容量的经济效

用,并对比了电动汽车参与 2 种服务的效益关系;文献[15]基于国内实际数据,研究了电动汽车参与电网辅助服务为 EV 用户带来的经济效益,同时文中给出了 EV 在历史数据拟合发展下碳减排的环境效益,但该文献并未进一步对 V2G 技术所带来的减碳环境效益进行探索。因此,如何在低碳化进程中充分利用 EV 的潜在减碳能力是一个值得深入研究的问题。

针对以往研究的空缺,该文将探索 EV 规模发展、区域能源网清洁能源消纳及车网互动技术应用等因素对碳减排发展路径的影响,提出一种基于系统动力学的能源网构成发展演化模型,综合考虑“双碳目标”的政策指导与电动汽车入网技术应用等影响因素。仿真验证表明,能源网与 EV 发展对碳减排的贡献有突出意义。

## 1 EV 入网与碳减排间的耦合关系

分析 EV 规模化发展过程以及 V2G 模式与碳排放之间的相互关系,介绍国内清洁能源发展规划方案,以及各种能源之间对碳流排放的影响关系。

### 1.1 EV 规模化发展对碳排放影响

随着社会群体环保意识的进一步增强和科学技术发展水平的不断提升,愈来愈多的家庭、企业以及公务人员会选择新能源汽车作为其出行交通工具。据国务院印发的《新能源汽车产业发展规划(2021—2030)》未来 5 年内国内新能源汽车销量占比达到 25%<sup>[16]</sup>。据统计,2019 年传统燃油车的 CO<sub>2</sub> 排放量高达 6.2 亿吨,其规模不可小觑<sup>[17]</sup>,因此 CV 向 EV 更快的转化,将为实现双碳目标做出极大贡献。该文引入图 1 中“电动汽车发展规模模块”,刻画 CV 向 EV 转化过程的碳排放量作为 EV 发展的碳减排依据。

其次 V2G 技术的发展,能够更大程度地发挥 EV 在碳减排方面的潜在效益。研究表明,EV 可作为灵活的分分布式储能资源,且可以以分、秒级的速度快速响应电网侧的需求变化。对此国内已有部分地区展开 EV 参与电网需求响应的试点工作,如 2020 年华北地区将车网互动充电桩正式纳入地方电力调峰服务市场进行结算<sup>[18]</sup>。截止 2021 年 4 月,国内

已有 15 个省市建设了 42 个 V2G 车网互动项目,布局了 612 个 V2G 终端<sup>[19]</sup>。由于现有需求响应资源主要以火电为主,而在整个能源结构中火电机组的碳排放量占比最大。若引入 V2G 技术,以 EV 替代

火电机组参与需求响应,将减少碳排放。因此,该文将 EV 作为需求响应资源,考虑其可响应容量、用户积极性等因素进一步挖掘 EV 降低碳排放量的潜力,如图 1 中“充放电响应模块”所示。

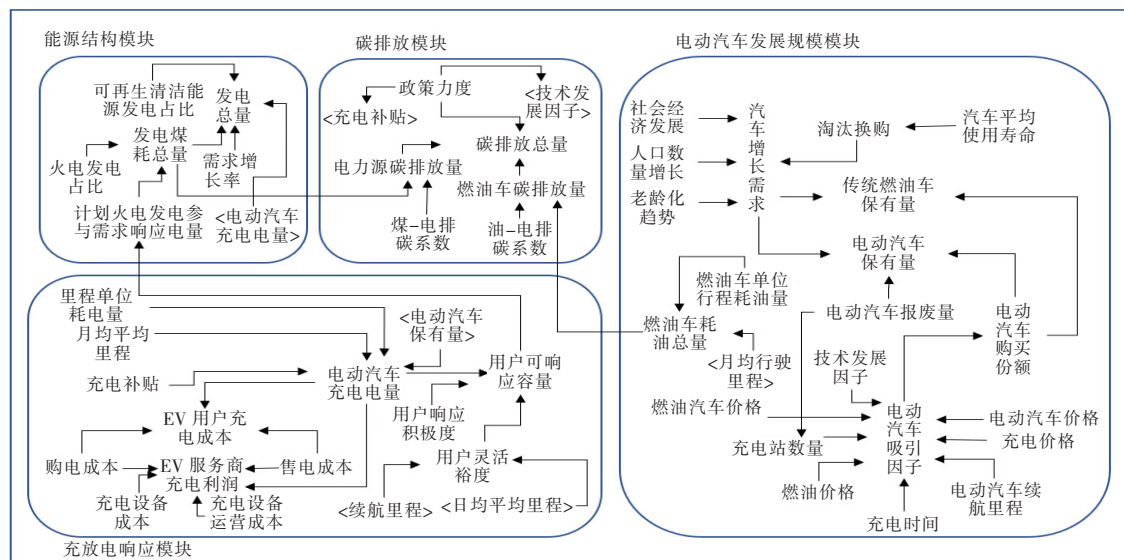


图 1 电动汽车入网对碳排放的关系

Figure 1 The diagram of the relationship between EV and Carbon emissions

## 1.2 能源网结构对碳排放影响

碳减排的宏观目标已经为未来 40 年能源网络的清洁化、低碳化发展定下了基调。根据国家能源局颁布的能源发展规划方案<sup>[20]</sup>,中国水电、风电及光伏发电装机规模已位列世界第一。加快清洁能源的消纳,减少化石能源的消耗是接下来 10 年间实现碳中和的必经之路。该文以国内清洁能源的宏观发展目标为引导,如图 1 中“能源结构模块”所示,通过构建清洁能源网的不同发展路径方案,采用系统动力学方法建模分析电动汽车入网与碳排放的关联影响。

## 2 双碳目标下车入网动力学模型

### 2.1 关联因素筛选

碳排放曲线的变化寓于一个复杂的系统中,受到众多因素的影响。而该文将主要探讨电动汽车入网与能源结构构成对碳减排效果的影响。现有 EV 规模受到汽车产业消费者的影响。

1)从社会角度看,社会群体的环保意识、社会区域人口收入水平、区域人口增长情况以及政府扶持力度都对电动汽车规模起到一定的影响作用。

2)从消费者购买决策看,EV 的发展水平、续航能力、充电设施的便利程度以及充电成本都是消费者在选购 EV 时的重要考虑因素。

3)从充电服务商角度看,电动汽车的数量显著增加将导致充电站的用电负荷的持续增加,充电服务收入的增加可为服务商进一步完善充电基础设施提供资金,从而吸引更多的汽车消费者选择 EV。

总之,在双碳目标背景下,电动汽车的规模受到社会、消费者及充电服务商的交互影响。通过分析并结合文献<sup>[21]</sup>,该文给出了双碳背景下电动汽车入网影响碳减排的主要因素,如图 1 所示。

### 2.2 系统动力学模型

系统动力学是主要用于研究复杂系统反馈结构与行为的科学。基于给定的目标由多个相互影响的因素构成的整体反馈系统,其中整体系统一般由多个有机结合的子系统构成。在子系统内,转态变量、速度流量和辅助变量通过反馈相互作用,最基本的一阶反馈可表示为一个多元一阶微分方程。内外界因素共同促成了系统发展的动态走势,并可用因果关系量化表示。系统动力学方法的主要特点是对数

据进行定性定量分析,即在统计数据的基础上,构建相关方程更准确地对问题进行描述。多个子系统构成了整个反馈系统,然而子系统又由不同的一阶反馈系统组成。一阶反馈系统一般可分为在循环中获得增强的正反馈系统和循环中逐渐趋于目标值的负反馈系统。系统动力学的建模流程如图 2 所示,包括确定关联性因素、分析因素间逻辑关系、建立动力学结构方程、流量存量图及仿真运行。

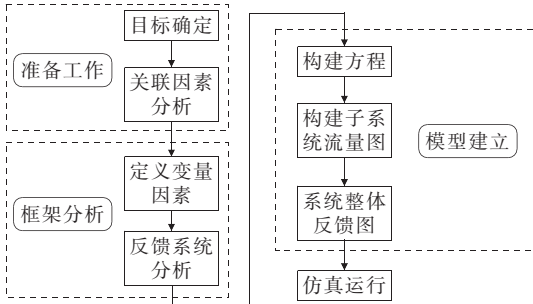


图 2 动力学流程

Figure 2 Main flow chart for system dynamics approach

### 2.3 子模块建模

基于系统动力学方法对电动汽车入网在双碳目标背景下碳排放变化进行建模,该文体具体将影响碳排放曲线变化分为 4 个子模块,分别为 EV 发展模块、充放电需求响应模块、能源结构模块以及碳排放模块。

#### 1) 电动汽车发展模块。

随着国内电动汽车的高速发展以及个人消费能力的逐步提升,EV 的需求愈来愈高。该文主要以社会、经济及电动汽车发展水平等因素构建 EV 与 CV 之间的转换动力学演化关系模型,如图 3 所示。

EV 的规模主要受购买量  $B_{EV}(t)$ 、报废量  $D_{EV}(t)$  以及初始保有量  $E_V^{parc}(t_0)$  的影响,即

$$E_V^{parc}(t) = \sum_0^T [B_{EV}(t) - D_{EV}(t)] + E_V^{parc}(t_0) \quad (1)$$

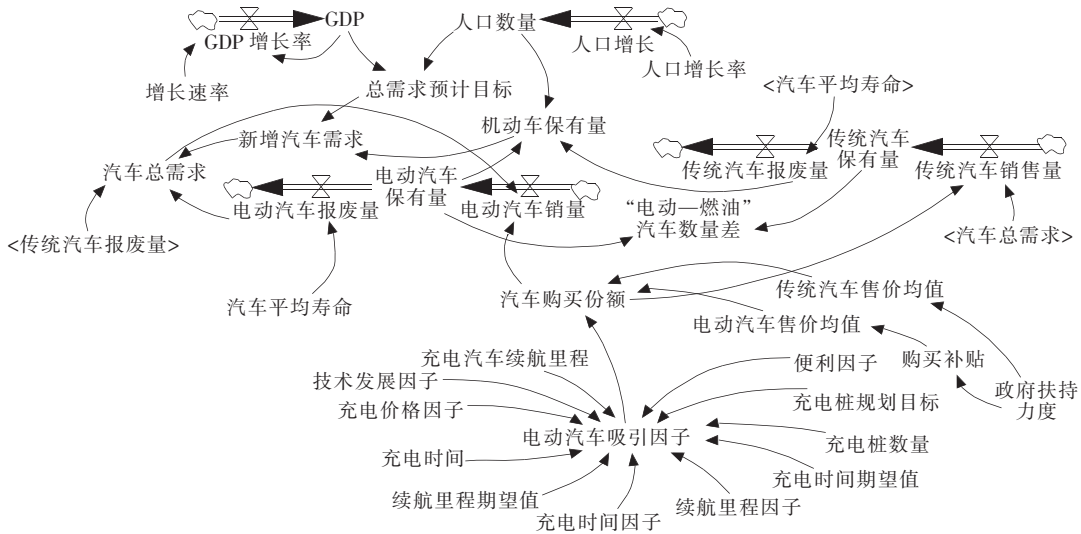


图 3 EV 规模演化模块

Figure 3 EV development module

$$B_{EV}(t) = T_D(t) \cdot E_V^{sp}(t) \quad (2)$$

$$D_{EV}(t) = E_V^{parc}(t) / [A_{VG}(t) - d_{elay}^1] \quad (3)$$

$$T_D(t) = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2 e^{-\beta_3 t}} \quad (4)$$

式(2)~(4)中  $T_D(t)$ 为事物发展规律影响值<sup>[22]</sup>;  $\beta_1 \sim \beta_3$ 为参数因子; $E_V^{sp}(t)$ 为EV的购买份额,代表EV的发展规模; $A_{VG}(t)$ 为汽车的寿命; $d_{elay}^1$ 为延迟报废时间。此外由于EV购买量及EV报废量

受EV发展过程中相关因素的制约,其计算方式分别如式(2)、(3)。同理对于CV发展规模可分别确定出购买量  $B_{CV}(t)$ 、报废量  $D_{CV}(t)$  以及初始保有量  $C_V^{parc}(t_0)$ ,即

$$C_V^{parc}(t) = \sum_0^T [B_{CV}(t) - D_{CV}(t)] + C_V^{parc}(t_0) \quad (5)$$

$$D_{CV}(t) = C_V^{parc}(t) / A_{VG}(t) \quad (6)$$

$$B_{CV}(t) = T_D(t) \cdot [1 - E_V^{sp}(t)] \quad (7)$$

另一方面, EV 购买份额受到 EV 售价  $E_V^{price}(t)$ 、CV 售价  $C_V^{price}(t)$  及 EV 产品吸引度  $E_V^{ATT}(t)$  的影响, 其计算形式为

$$E_V^{sp}(t) = E_V^{ATT}(t) \cdot \eta_1 + [E_V^{Price}(t) - C_V^{Price}(t) - A_P(t)] \eta_2 \quad (8)$$

式中  $A_P(t)$  为 EV 购置补贴;  $\eta_1 \sim \eta_2$  为购买份额因素的影响因子。

电动汽车吸引因子的计算形式为

$$\begin{aligned} [E_V^{ATT}(t) &= [E_V^R(t)/E_V^{RE}(t)] \eta_3 + [E_V^T(t)/E_V^{TE}(t)] \eta_4 + [E_V^{CS}(t)/E_V^{CSE}(t)] \eta_5 \\ \{E_V^R(t) &= c_4 \cdot e^{-T_D(t)} \\ E_V^T(t) &= c_5 \cdot e^{-T_D(t)} \\ [E_V^{CS} &= c_6 \cdot t \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $E_V^R(t)$  为 EV 续航里程数期望值;  $E_V^T(t)$  为 EV 充电时间期望值;  $E_V^{RE}(t)$ 、 $E_V^{TE}(t)$  分别为用户对 EV 续航和充电时间的理想目标值;  $E_V^{CS}(t)$  为充电站数量;  $\eta_3 \sim \eta_5$  分别为各因素的因子;  $c_4 \sim c_6$  分别为 EV 续航里程、充电时间的初始值、每月建设的充电站数量。

汽车规模的需求受到城市社会发展、经济状况及人口增长等因素的影响, 因此通过汽车需求规模期望值  $V_{PT}(t)$  及汽车规模  $V_P(t)$  可得现有汽车总需求量, 即

$$V_{PT}(t) = V_{PT}(t_0) \cdot G_R(t) \cdot P_{RT}(t) \cdot c_1 \quad (10)$$

$$V_P(t) = [E_V^{parc}(t) + C_V^{parc}(t)] / P_{OP}(t) \quad (11)$$

$$N_D(t) = [V_{PT}(t) - V_P(t)] \cdot \alpha_1 \quad (12)$$

式(10)~(12)中  $G_R(t)$  为 GDP 增长率;  $P_{RT}(t)$  为人口增长率;  $c_1$  为 GDP 和人口对电动汽车影响率的常数;  $\alpha_1$  为汽车的需求因子。

城市 GDP 量  $C_{GDP}(t)$  以及人口数量  $P_{OP}(t)$  的计算方式为

$$C_{GDP}(t) = \sum_0^T C_{GDP}(t) \cdot G_R(t) + C_{GDP}(t_0) \quad (13)$$

$$P_{OP}(t) = \sum_0^T P_{OP}(t) \cdot P_{RT}(t) + P_{OP}(t_0) \quad (14)$$

综上可得到汽车变化量为

$$T_1(t) = D_{EV}(t) + D_{CV}(t) + N_D(t) \quad (15)$$

2) 充放电响应模块。

EV 充放电设施主要由充电运营商提供, 作为独立企业的运营商需要承担充电设施建设成本  $C_{st}(t)$  及运维成本  $M_{an}(t)$ , 且收入来源为客户缴纳的充电服务费  $B_{en}(t)$ , 各因素计算方式分别为

$$B_{en}(t) = [(p_{cha}(t) - p_{pur}) \cdot L_{cha}(t)] + [\eta \cdot L_{dis}(t)] \quad (16)$$

$$M_{an}(t) = C_{man} \cdot E_V^{CS}(t) \quad (17)$$

$$C_{str}(t) = E_V^{CS}(t) \cdot \theta \cdot (C_{str}^{per} - \alpha \cdot S_{ub}) \quad (18)$$

式(16)中  $P_{cha}(t)$  为充电单价;  $P_{pur}$  为运营商购电单价。

因此充电运营商的总收益为

$$B_{op} = \sum_0^T [B_{en}(t) - M_{an}(t) - C_{str}(t)] + B_{op}(t_0) \quad (19)$$

对于 EV 用户充电成本  $C_{user}(t)$  与月均充电量  $L_{cha}(t)$  受到月均行驶里程期望值  $E_{mil}$ 、充电单价、EV 保有量及里程耗电量  $P_{krc}(t)$  共同决定, 即

$$C_{user}(t) = L_{cha}(t) \cdot P_{cha}(t) \quad (20)$$

$$L_{cha}(t) = E_V^{parc}(t) \cdot P_{krc}(t) \cdot E_{mil} \quad (21)$$

$$p_{cha}(t) = p_{cha}(t_0) - S_{ub}^{cha}(t) \quad (22)$$

$$S_{ub}^{cha}(t) = S_{ub}^{cha}(t_0) \cdot e^{-L_{cha}^{total}} \quad (23)$$

$$L_{cha}^{total} = \sum_0^T (E_V^{parc}(t) \cdot P_{krc}(t) \cdot E_{mil}) + L_{cha}^{total}(t_0) \quad (24)$$

式(23)中  $S_{ub}^{cha}(t)$  为充电单价受政策因素影响的调控因子。此处需强调的是充电单价(充电服务费)受到政策因素的宏观调控, 因此该文假设其是一个受 EV 总充电量影响的结果<sup>[22]</sup>。

由于引入 V2G 技术后 EV 用户会获得一定的经济收益, 按照《广州市虚拟电厂实施细则》<sup>[23]</sup> 中提到的需求响应补偿规则, 可得到放电响应相关因素计算方式。EV 灵活裕度为

$$A_{va} = N_{um} \cdot E_{rang} - E_{mil} \quad (25)$$

式中  $N_{um}$  为月均充电次数;  $E_{rang}$  为 EV 电池容量期望值。

用户月均放电电量为

$$L_{dis}(t) = A_{va} \cdot P_{ac}(t) \cdot L_{dis}^{rule} \quad (26)$$

式中  $P_{ac}(t)$  为用户响应积极度。

用户月均放电收益为

$$P_{user}^{dis}(t) = p_{ri}^{dis} \cdot E_v^{parc}(t) \cdot L_{dis}(t) \quad (27)$$

式中  $P_{ri}^{dis}$  为放电补贴。

综上可得到 EV 用户的总充电支出,其主要由月均充电成本与月均放电收益共同决定,即

$$C_{user}^{total} = \sum_0^T [P_{user}^{dis}(t) - C_{user}(t)] \quad (28)$$

充放电响应模块的反馈子系统如图 4 所示。

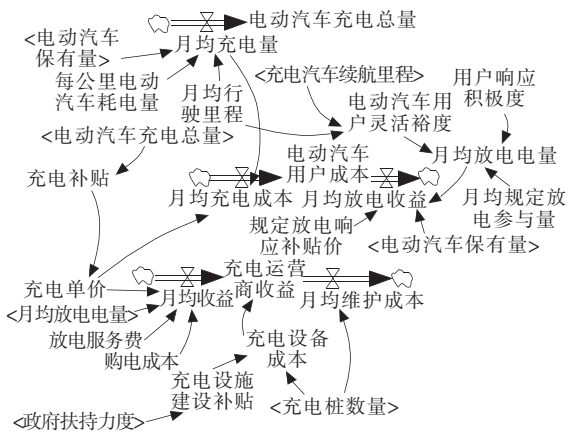


图 4 充放电响应模块

Figure 4 Charge or discharge response module

### 3) 能源结构模块。

随着能源可持续发展的推进,可再生清洁能源的结构占比将在此背景下进一步扩大,该文通过模拟清洁能源不同发展路径,基于动力学反馈模型研究清洁能源占比变化对区域能源网碳排放的影响进行仿真对比,分析不同方案下碳排放的变化规律,其反馈流程图如图 5 所示。

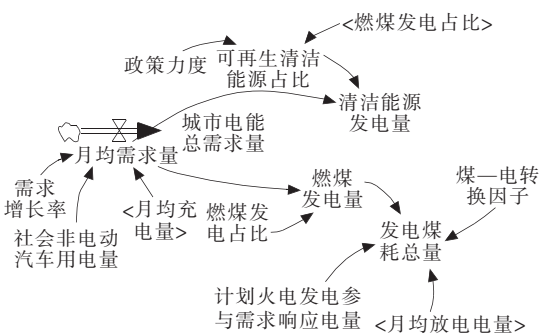


图 5 能源结构模块

Figure 5 Energy structure module

对于全社会月均电力需求总量,该文将其定义为由社会非电动汽车需求电量  $D_e^s(t)$  与充电电量组

成,即

$$D_e^{total} = \sum_0^T [D_e^s(t) + L_{cha}(t)] \quad (29)$$

社会非电动汽车月均需求电量为

$$D_e^s(t) = (\omega)^t \cdot D_e^s(t_0) \quad (30)$$

式中  $\omega$  为负荷增长率;  $D_e^s(t_0)$  为仿真初始年限的电力需求量。

可再生能源发电量为

$$E_{le}^{re}(t) = p_{er}^{re}(t) \cdot D_e^s(t) \quad (31)$$

$$p_{er}^{re}(t) = p_{lo}(t) \cdot \delta(t) \quad (32)$$

式(31)、(32)中  $p_{er}^{re}(t)$  为清洁能源占比情况,受到政策因素  $p_{lo}(t)$  的影响;  $\delta(t)$  为政策调控因子。

燃煤火电机组发电量  $E_{le}^{coal}(t)$  及火力发电导致的燃煤消耗量  $Q_{coal}(t)$  的计算方法为

$$[E_{le}^{coal}(t) = [1 - p_{er}^{re}(t)] \cdot D_e^s(t)$$

$$\{Q_{coal}(t) = [E_{le}^{coal}(t) + D_R(t) - L_{dis}(t)] \cdot \alpha^{e-c}$$

$$[D_R(t) = D_e^s(t) \cdot \tau \quad (33)$$

(33)

式中  $p_{er}^{re}(t)$  为清洁能源占比情况;  $D_R(t)$  为参与每月需求响应的火力发电量,其值主要由负荷需求总量决定<sup>[10]</sup>;  $\tau$  为需求响应占比系数。

### 4) 碳排放模块。

该文主要探讨的是能源侧结构发展路径以及电动汽车入网等相关因素对中国实现“碳中和、碳达峰”的影响程度,即定量分析电动汽车入网对碳排放的量影响,因此该模块主要通过耦合前文所构建的 3 个子反馈系统并对碳排放量进行综合分析,其耦合关联如图 6 所示。

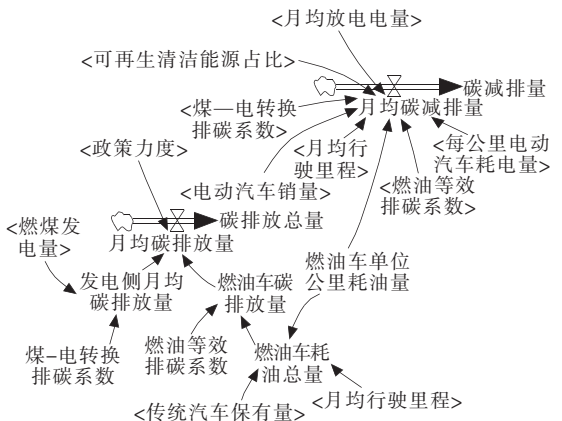


图 6 碳排放模块

Figure 6 Carbon emission module

月均电动汽车入网以及能源供能侧导致的碳流碳排放量  $C_{ar}(t)$ , 其主要由发电侧供能碳排放量  $G_{en}(t)$  以及燃油车尾气导致的碳排放量  $F_{uel}(t)$  两部分组成, 即

$$\begin{cases} C_{ar}(t) = \sum_0^T [G_{en}(t) + F_{uel}(t)] \\ G_{en}(t) = Q_{coal}(t) \cdot \alpha_{carbon}^{e-c} \\ F_{uel}(t) = Q_{fuel}(t) \cdot \alpha_{carbon}^{f-c} \\ Q_{fuel}(t) = P_{krf}(t) \cdot E_{mil} \cdot C_v^{parc}(t) \end{cases} \quad (34)$$

式中  $G_{en}(t)$  为发电侧碳排放量;  $F_{uel}(t)$  为燃油车碳排放量;  $Q_{fuel}(t)$  为 CV 月均耗油量;  $\alpha_{carbon}^{e-c}$ 、 $\alpha_{carbon}^{f-c}$  分别为燃煤排碳系数与燃油排碳系数;  $P_{krf}(t)$  为燃油车单位公里耗油量。

因此, 碳减排的具体值为

$$\begin{cases} R_{carbon}(t) = R_{carbon}^{EV-CV}(t) + R_{carbon}^{der}(t) + R_{carbon}^{energy}(t) \\ R_{carbon}^{EV-CV}(t) = [P_{krc}(t) \cdot (1 - p_{er}^{re}(t)) \cdot \alpha^{e-c} \cdot \\ \alpha_{carbon}^{e-c} - P_{krf}(t) \cdot \alpha_{carbon}^{f-c}] \cdot E_{mil} \cdot B_{EV}(t) \\ R_{carbon}^{der}(t) = L_{dis}(t) \cdot p_{er}^{re}(t) \cdot \alpha^{e-c} \cdot \alpha_{carbon}^{e-c} \\ R_{carbon}^{energy}(t) = \frac{d(p_{er}^{re}(t))}{dt} \cdot D_c^s(t) \cdot \alpha^{e-c} \cdot \alpha_{carbon}^{e-c} \end{cases} \quad (35)$$

式中  $R_{carbon}^{EV-CV}(t)$  为 EV 增长贡献的碳减排量;  $R_{carbon}^{der}(t)$  为 EV 参与需求响应贡献的碳减排量;  $R_{carbon}^{energy}(t)$  为能源侧清洁能源占比扩大贡献的碳减排量。

## 3 算例分析

### 3.1 算例基础数据

该文以中国西南某城市作为算例仿真研究对象, 通过对该区域统计数据年鉴进行调研得到研究区域相关的基础数据值。该区域不仅具有国内清洁能源渗透率较高的特性, 同时具有较大的 EV 发展潜力, 据统计该区域汽车保有量位居全国前列, 但电动汽车规模仅占 2.3%, 因此选取该区域作为研究对象。调用 Vensim 软件, 建立存量流量反馈系统图, 仿真分析 EV 发展及能源侧结构变化对区域碳排放轨迹的影响。仿真时间设置情况为①初始时间设为: 2021 年 1 月; ②结束时间设为: 2030 年 12 月, 共计 120 个月; ③研究中的时间步长设为 1 个月。此外参考文献[15], 该研究针对清洁能源的发展情

况做出以下假设, 仿真开始与结束时的清洁能源占比为定值。拟定 3 种清洁能源的发展路径, 分别为普通场景、悲观场景和乐观场景, 3 种场景的区别为在普通场景中, 清洁能源占比线性速度递增; 在悲观场景中增速为先慢后快; 在乐观场景中增速为先快后慢。模型初始参数设置如表 1 所示。

表 1 参数初始值

Table 1 Initial value of parameters		
参数	单位	初始值
EV 规模	万辆	12.3
CV 规模	万辆	508
清洁能源起始占比	%	20
清洁能源末端占比	%	5
充电单价	元	0.9
油碳转换系数	kg/L	0.648
煤碳转换系数	kg/(kW·h)	0.786
汽车初始总销量	万辆	4.82
日均行驶里程	km	85
EV 耗电量	(kW·h)/100 km	14

### 3.2 仿真结果分析

#### 3.2.1 EV 发展状况

EV 在仿真实验中的发展演化轨迹如图 7 所示。由图 7 可知, EV 购买量呈现典型增长趋势, 在前 60 个月, 充电基础设施相对不完善、消费者认可度较低以及充电时间较慢等因素造成了购买量相对较低; 后 60 个月, 受先期国家政策影响, 充电基础设施相对完善, 而科技的发展与消费水平的提高更加促进 EV 购买量的增长。在仿真末期, 购买率接近 40%, EV 逐步替代 CV 的现象已经大势所趋。此外, 图中也给出了 CV 与 EV 保有量发展趋势, 由仿真结果可知 2030 年 EV 保有份额约为 25%。

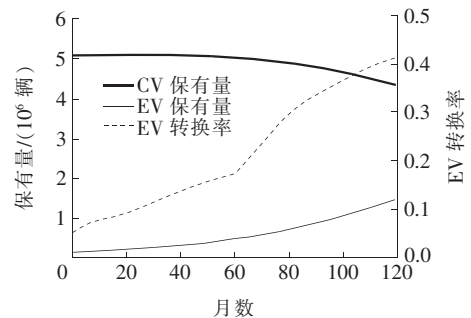


图 7 EV 和 CV 规模及 EV 购买率

Figure 7 Purchase rate and scale of EV and CV

### 3.2.2 碳排放曲线

根据清洁能源发展规律,本文模拟了3档速率的清洁能源的发展路径,3种发展路径下的碳排放总量的轨迹如图8所示。

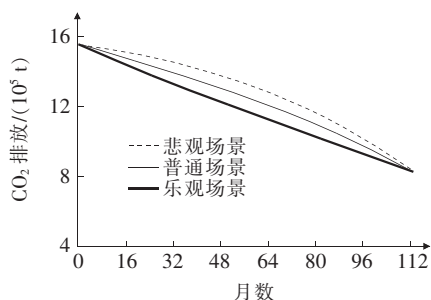


图8 清洁能源不同发展路径下的CO<sub>2</sub>排放量

Figure 8 CO<sub>2</sub> emissions under different paths of clean energy

由图8可知,清洁能源占比的逐步提升、EV规模的持续扩大及EV用户主动参与需求响应积极性的提高,到2030年该研究区域火力发电及CV尾气造成的CO<sub>2</sub>排放量将减少约46%,为实现双碳目标作出了一定的贡献。

不同场景下各个模块的碳排放变化情况如图9

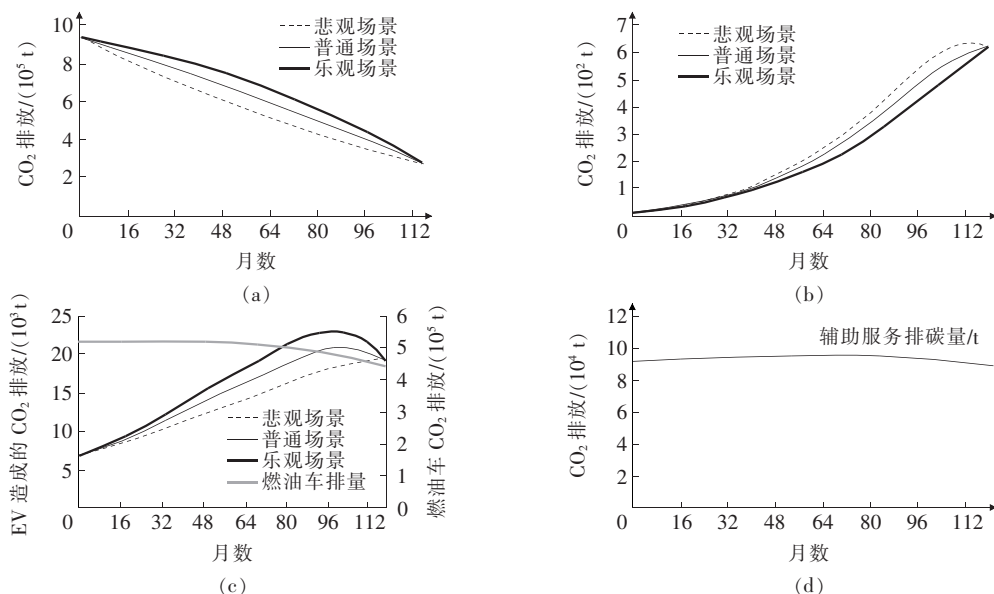


图9 不同模块的CO<sub>2</sub>排放量

Figure 9 CO<sub>2</sub> emissions of different modules

### 3.2.3 碳减排灵敏度分析

为了进一步说明电动汽车入网对碳排放的影响,将定量分析EV规模演化以及其作为需求响应资源对碳减排的贡献。

所示,图9(a)为火力发电机组产生的CO<sub>2</sub>排放量,由图可知随着清洁能源的占比逐渐扩大,火电机组碳排放量以线性速度下降,以普通场景为例在时间段内降低了约69%的碳排放量。图9(b)给出了EV作为需求响应侧资源产生的碳排放量,此处考虑的碳排放量源自EV充电所用的火力发电。从图中可知早期受到EV规模占比以及用户参与需求响应的积极度较低的影响,其产生的碳排放量相对较少,但随着EV规模的逐步扩大以及EV用户需求响应参与度的提升,碳排放量增速明显加快(其带来的减碳效益将在下小节中详细讨论)。图9(c)分别给出了CV造成与EV的碳排放量变化曲线,由于受到电动汽车占比逐步提升的影响,CV碳排放总量在约第70月处开始出现明显的降低。图9(d)给出了火电机组参与辅助服务所造成的碳排放量曲线。早期区域负荷需求增大,需要更多的需求响应资源以满足区域电力的稳定;随着EV作为需求响应资源,响应容量逐步增加,从第60月碳排放量开始出现下降趋势,由此验证了EV作为需求响应资源对碳减排具有一定的贡献。

1)EV规模演化对碳减排的影响。

清洁能源占比发生变化下EV规模演化过程中的碳减排灵敏度如图10所示,图中阴影部分表示了EV规模演化对碳减排的贡献量。在仿真时间末



段, EV 发展带来的碳减排量约为 12 万 t/月。由碳排放量曲线可知, 单纯 EV 规模的持续扩大并不能使碳排放量见顶, 而清洁能源渗透率的提高才是达成双碳目标的主导因素。

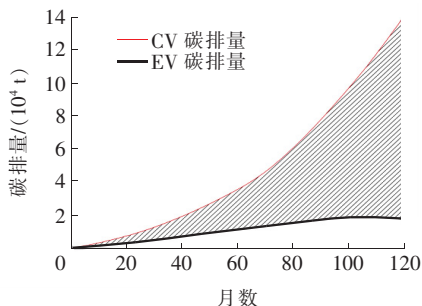


图 10 CV 与 EV 的碳排量比较

Figure 10 Comparison of CO<sub>2</sub> between CV and EV

2) EV 作为需求响应资源带来的碳减排效益。

目前电力需求响应主要由火电机组承担, 由此产生的碳排放量巨大。而 V2G 技术的发展为碳减排提供了新的路径。火电机组与 EV 在同等需求响应量情景下的 CO<sub>2</sub> 排放量如图 11 所示。

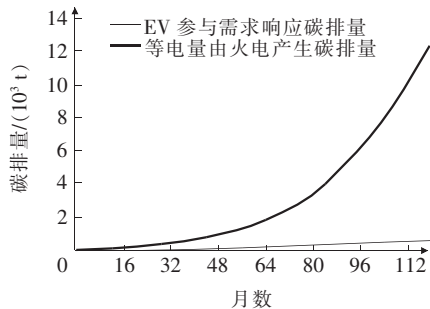


图 11 需求响应碳排量对比

Figure 11 Comparison of CO<sub>2</sub> from the demand response

图 11 表明 EV 参与需求响应所带来的碳减排效益具有明显的优势, 尤其是在清洁能源占比逐步扩大的情景下。

此外, 该文仿真还发现 EV 用户参与需求响应的积极性限制了碳减排的效果, 因此 V2G 技术的大规模开展能够显著提升碳减排效益。

## 4 结语

该文采用系统动力学方法, 建立了基于电动汽车入网及清洁能源发展变化下的碳排放模型。首先建立了在动力学系统演化下 EV 规模发展的子系统模块, 其次进一步考虑 EV 作为需求响应资源, 构建了 EV 充放电响应子系统模块, 最后通过模拟不同

清洁能源占比发展路径, 定量分析 EV 入网与电力能源侧结构变化对碳排放的影响。通过仿真分析可得到如下结论:

1) 清洁能源的发展将主导碳减排, 是实现双碳目标的关键。建议结合生产实际, 以高标准稳步推进能源清洁化;

2) EV 的规模发展在清洁能源占比较高的区域能够发挥更为明显的碳减排作用;

3) V2G 技术蕴藏着巨大的潜在减碳效益, 但其发展受限于 EV 用户的参与度, 因此建议大力发展车网互动技术以及激励 EV 用户参与需求响应, 充分发挥 EV 在双碳目标下的作用。

该文构建了 EV 入网与清洁能源占比变化对区域碳排放模型, 并分析了不同因素对碳排放的影响, 为实现 30 碳达峰 60 碳中和目标提供了参考意义。在未来的研究中, 还需要进一步对 V2G 技术的用户参与度进行建模分析, 更加细化地探讨 V2G 技术带来的综合效益。

## 参考文献:

- [1] 辛保安. 为实现“碳达峰、碳中和”目标贡献智慧和力量 [N]. 中国电力报, 2021-02-24(001).
- [2] 李兴源, 蒋林洳, 陈中, 等. 考虑电动汽车互动的综合能源系统扩展规划 [J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(4): 106-114.  
LI Xingyuan, JIANG Linru, CHEN Zhong, et al. Expansion planning of integrated energy system with the interaction between electric vehicles and power grid [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(4): 106-114.
- [3] 陈明强, 高健飞, 畅国刚, 等. V2G 模式下微网电动汽车有序充电策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 141-148.  
CHENG Mingqiang, GAO Jianfei, CHANG Guogang, et al. Research on orderly charging strategy of micro-grid electric vehicles in V2G model [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 141-148.
- [4] 高瑞, 孙中伟. 自愈组密钥分配在电动汽车通过 VANET 参与 V2G 中的应用 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 85-91.  
GAO Rui, SUN Zhongwei. Self-healing group key distribution applied to electric vehicles participating in V2G through VANET [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 85-91.
- [5] 王睿, 高欣, 李军良, 等. 基于聚类分析的电动汽车充电负荷预测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 37-44.

- WANG Rui, GAO Xin, LI Junliang, et al. Electric vehicle charging demand forecasting method based on clustering analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(16): 37-44.
- [6] 常小强, 宋政湘, 王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. *高压电器*, 2020, 56(8): 1-5.  
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on monte carlo algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(8): 1-5.
- [7] 倪凯旋. 基于分布式博弈的电动汽车充电站最优调度方法[J]. *供用电*, 2020, 37(2): 79-84.  
NI Kaixuan. Optimal scheduling of electric vehicle charging station based on distributed game[J]. *Distribution & Utilization*, 2020, 37(2): 79-84.
- [8] 郭小帆, 马天男, 王超, 等. 计及电动汽车充电站接入的配电网网架规划优化研究[J]. *智慧电力*, 2019, 47(6): 64-70.  
GUO Xiaofan, MA Tiannan, WANG Chao, et al. Power distribution network structure planning considering access of electric vehicle charging station[J]. *Smart Power*, 2019, 47(6): 64-70.
- [9] 曾鸣, 曾繁孝, 朱晓丽, 等. 基于 Bass 模型的我国电动汽车保有量预测[J]. *中国电力*, 2013, 46(1): 36-39.  
Zeng Ming, Zeng Fanxiao, Zhu Xiaoli, et al. Forecast of electric vehicles in China based on Bass model[J]. *Electric Power*, 2013, 46(1): 36-39.
- [10] Egbue O, Long S. Barriers to widespread adoption of electric vehicles: an analysis of consumer attitudes and perceptions[J]. *Energy Policy*, 2012, 48: 717-729.
- [11] 杨威, 向月, 刘俊勇, 等. 基于多代理技术的电动汽车规模演化模型[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2146-2154.  
YANG Wei, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Multi-agent modeling for the scale evolution of plug-in electric vehicles[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2146-2154.
- [12] 马瑞, 袁书林, 秦泽宇. 考虑风电不确定性的电力系统碳排放流分析[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(17): 124-129.  
MA Rui, YUAN Shulin, QIN Zeyu, et al. Analysis on carbon emission flow of power system with uncertain wind power injection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(17): 124-129.
- [13] Rudi A, Frohling M, Zimmer K, et al. Freight transportation planning considering carbon emissions and in-transit holding costs: a capacitated multi-commodity network flow model[J]. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2016, 5(2): 123-160.
- [14] 陆凌蓉, 文福拴, 薛禹胜, 等. 电动汽车提供辅助服务的经济性分析[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(14): 43-49+58.  
LU Lingrong, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Economic analysis of ancillary service provision by plug-in electric vehicles[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(14): 43-49+58.
- [15] 周椿奇, 向月, 张新, 等. V2G 辅助服务调节潜力与经济性分析: 以上海地区为例[J/OL]. *电力自动化设备*: 1-7 [2021-06-11]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202104007>.  
ZHOU Chunqi, XIANG Yue, ZHANG Xin, et al. Potential flexibility and economic analysis of auxiliary service by V2G: a Shanghai example[J/OL]. *Electric Power Automation Equipment*: 1-7 [2021-06-11]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202104007>.
- [16] 中国政府网. 新能源汽车产业发展规划(2021—2035) [EB/OL]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content\\_5556716.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm), 2020-11-02.
- [17] 汽车工业节能与绿色发展评价中心. 中国生态汽车采购倡议计划[EB/OL]. <http://www.yidiansixun.com/article/0Q6ESu0M>, 2020-08-04.
- [18] 中国能源网. 华北将 V2G 充电桩资源正式纳入电力调峰辅助服务市场并结算[EB/OL]. [http://www.cnenergy.org/cсны/202004/t20200423\\_762491.html](http://www.cnenergy.org/cсны/202004/t20200423_762491.html), 2020-04-23.
- [19] 全国能源信息平台. 国内最大规模工业园区车联网互动 V2G 项目投运 [EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1698290846116817469&wfr=spider&for=pc>, 2021-04-28.
- [20] 中国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[EB/OL]. <http://www.scio.gov.cn/zfbps/32832/Document/1695117/1695117.htm>, 2020-12-21.
- [21] Xiang Y, Zhou H, Yang W, et al. Scale evolution of electric vehicles: a system dynamics approach[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 8859-8868.
- [22] 刘继春, 贾琢玉, 向月, 等. 泛在电力物联网下电动汽车充电服务费定价模式[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(4): 33-41.  
LIU Jichun, JIA Zhuoyu, XIANG Yue, et al. Pricing model of electric vehicle charging in ubiquitous energy network connecting everything[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(4): 33-41.
- [23] 广州市工业和信息化局. 广州市虚拟电厂实施细则(征求意见稿)[EB/OL]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1692180907705004232&wfr=spider&for=pc>, 2021-02-20.