

4-14-2021

## Modeling and Simulation of Electric Vehicle Industry Development Based on System Dynamics

Yueqiang Fu

*The Center of Collaboration and Innovation, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China;*

Tiantian Xia

*The Center of Collaboration and Innovation, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Modeling and Simulation of Electric Vehicle Industry Development Based on System Dynamics

## Abstract

**Abstract:** New energy electric vehicle are the main trend of automobile industry upgrading. It plays an important role in ensuring the energy security and improving the ecological environment. It is of theoretical and practical significance to carry out research on the development of new energy electric vehicles. *The affecting factors are systematically analyzed, the causal relationship model and stock flow model are established, and the dynamic equation of the model are determined and the parameter assignments are made.* The model is verified and the system simulation and analysis are performed. The development trend and main influencing factors of new energy electric vehicles are explored. The countermeasures for the development of electric vehicle industry are put forward from the aspects of government subsidies, key technological breakthroughs, charging and replacement infrastructure construction, and consumer market cultivation.

## Keywords

system dynamics, electric vehicle, Vensim, system simulation

## Recommended Citation

Fu Yueqiang, Xia Tiantian. Modeling and Simulation of Electric Vehicle Industry Development Based on System Dynamics[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(4): 973-981.

# 基于系统动力学的电动汽车产业发展建模与仿真

付跃强, 夏天添

(江西科技学院 协同创新中心, 江西 南昌 330098)

**摘要:** 新能源电动汽车是汽车产业升级的主要方向, 对保障能源安全、改善生态环境有重要作用, 因此, 开展新能源电动汽车发展研究有一定的理论和现实意义。对电动汽车产业发展的影响因素进行系统分析, 建立因果关系模型、存量流量模型, 确定动力学方程并进行参数赋值。在模型有效性得到验证的基础上, 进行系统仿真和分析, 探索新能源电动汽车发展趋势及主要影响因素, 并从政府补贴、关键技术突破、充换电基础设施建设、消费市场培育等方面提出了电动汽车产业发展对策建议。

**关键词:** 系统动力学; 电动汽车; Vensim; 系统仿真

中图分类号: N941.3; TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X (2021) 04-0973-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0648

## Modeling and Simulation of Electric Vehicle Industry Development Based on System Dynamics

Fu Yueqiang, Xia Tiantian

(The Center of Collaboration and Innovation, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China)

**Abstract:** New energy electric vehicle are the main trend of automobile industry upgrading. It plays an important role in ensuring the energy security and improving the ecological environment. It is of theoretical and practical significance to carry out research on the development of new energy electric vehicles. The affecting factors are systematically analyzed, the causal relationship model and stock flow model are established, and the dynamic equation of the model are determined and the parameter assignments are made. The model is verified and the system simulation and analysis are performed. The development trend and main influencing factors of new energy electric vehicles are explored. The countermeasures for the development of electric vehicle industry are put forward from the aspects of government subsidies, key technological breakthroughs, charging and replacement infrastructure construction, and consumer market cultivation.

**Keywords:** system dynamics; electric vehicle; Vensim; system simulation

## 引言

“中国制造 2025”是我国的重大发展战略, 而汽车产业转型升级对实现这个战略的宏伟目标具有深远的战略意义<sup>[1]</sup>。新能源电动汽车发展已成为汽车产业转型升级的主要方向, 对保障能源安全、改善生态环境有重要作用<sup>[2]</sup>。在国家政策的大力扶持

下, 新能源汽车保有量快速增长<sup>[3]</sup>。根据公安部数据, 截至 2019 年 6 月底, 全国新能源汽车保有量达 344 万辆, 其中纯电动汽车保有量 281 万辆。据专家预测, 新能源电动汽车保有量未来还将有一个快速增长<sup>[4]</sup>。因此, 开展新能源电动汽车发展研究有一定的理论和现实意义。

收稿日期: 2019-12-12 修回日期: 2020-03-28

基金项目: 江西省社科规划项目(19YJ29); 江西科技学院开放基金(19XTKFYB07); 江西省教改项目(JXJG-18-24-2)

第一作者: 付跃强(1966-), 男, 博士, 高工, 研究方向为系统动力学、产业经济。E-mail: 13687830@qq.com

对于新能源电动汽车发展的研究,一些学者以充电基础设施为研究对象,研究充电基础设施与市场的关联关系<sup>[5-6]</sup>;一些学者研究电池、电控、电机等新能源电动汽车关键技术的发展状况<sup>[7-9]</sup>;还有一些学者分别在电动汽车产业政策<sup>[10-11]</sup>、产业发展战略<sup>[12]</sup>、政企合作博弈<sup>[13]</sup>、产业竞争力研究<sup>[14]</sup>、产业商业模式<sup>[15]</sup>等领域开展了研究。综上所述,学者们的努力丰富了新能源电动汽车的研究领域,这些研究领域相互关联、相互作用,是一个复杂的非线性系统,复杂的非线性系统非常适合采用系统动力学的方法建立模型开展仿真研究。目前应用系统动力学方法来研究新能源电动汽车发展的文献已出现一些<sup>[16-18]</sup>,但数量较少而且研究尚没有形成体系,有必要应用系统动力学开展进一步的探索。

系统动力学是由美国麻省理工学院Forrester教授于1956年创立的复杂非线性系统仿真方法,在自然科学、社会科学等领域均得到广泛应用的<sup>[19-20]</sup>。

## 1 电动汽车发展系统因果关系模型

### 1.1 电动汽车发展主要影响因素分析

新能源电动汽车发展系统是一个复杂的社会经济系统,包含了经济发展、产业政策、核心技术、充电基础设施、环境保护等子系统,受一系列相互关联、相互作用的要素影响,要素间存在动态反馈作用,属于非线性系统。电动汽车发展影响因素分析可以用电动汽车保有量影响因素分析来替代,本文通过对电动车保有量影响因素的优化来探讨新能源电动汽车的发展趋势。

电动汽车保有量一方面会因为电动汽车购买量而增加,一方面会因为电动汽车报废量而减少。电动汽车购买量由汽车购买量以及电动汽车购买占比决定。汽车购买量包括汽车报废引发的换车需求以及因社会经济增长而新增的汽车需求。电动汽车购买占比指电动汽车购买量与汽车购买量的比值,它受许多复杂因素的影响。通过简化,本文认为电动汽车购买占比的关键影响因素如图1所示,图中EV (electric vehicle)为电动汽车的缩写。

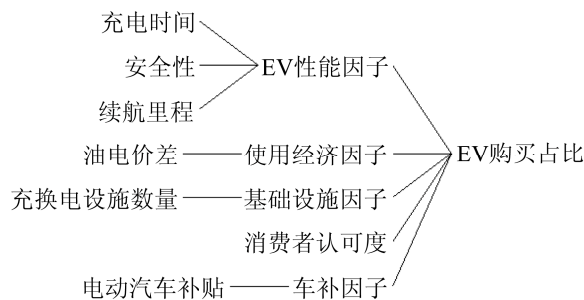


图1 EV购买占比原因树

Fig. 1 Reason tree for EV purchase proportion

从图1中可知,EV性能(充电时间、续航里程、安全性)、使用经济性(油电价差)、便利性(充换电设施数量)、车补(电动汽车补贴)以及消费者的认可度等都会影响电动汽车购买占比。

### 1.2 电动汽车保有量因果关系模型

研究认为,新增汽车需求来源有2个:(1)经济发展催生的首次购车族;(2)有车族的换购需求。这种需求经过刺激成为汽车购买量,在各种优惠政策因素促进下,新能源汽车购买比例会逐年增加。影响新能源购买比例的主要因素包括了充电的便利性、充电价格、一次充电续航里程、充电时间、安全性、购车补贴等。在分析这些因素之间相互关系的基础上,建立电动汽车保有量的因果关系模型,如图2所示,图中CV (conventional vehicle)为传统汽车的缩写。

图2中包括众多反馈回路,其中涉及EV保有量的主要因果反馈循环如下:

(1) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ -EV保有量。

(2) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

(3) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +车补因子 $\rightarrow$ +购买因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

(4) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +成本因子 $\rightarrow$ +购买因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

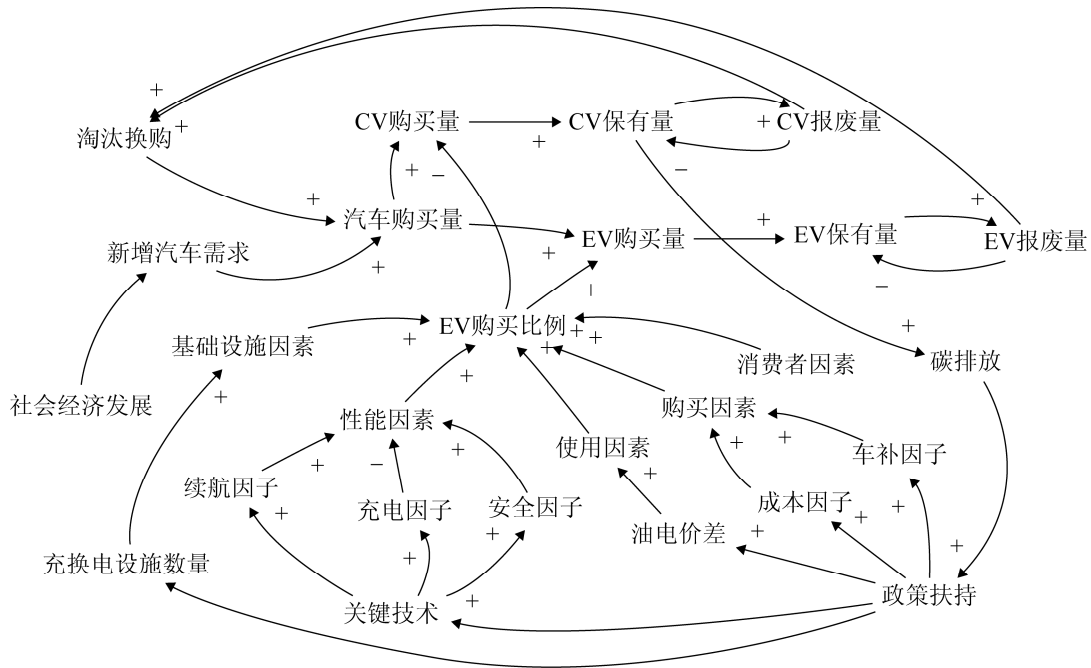


图 2 电动汽车保有量因果关系图  
Fig. 2 Causal relationship model of electric vehicle ownership

(5) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +油电价差 $\rightarrow$ +使用因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

(6) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +充换电设施数量 $\rightarrow$ +基础设施因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

(7) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +关键技术 $\rightarrow$ +充电因子 $\rightarrow$ 性能因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

(8) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +关键技术 $\rightarrow$ +安全因子 $\rightarrow$ 性能因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

(9) EV保有量 $\rightarrow$ +EV报废量 $\rightarrow$ +淘汰换购 $\rightarrow$ +汽车购买量 $\rightarrow$ +CV购买量 $\rightarrow$ +CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +关键技术 $\rightarrow$ +续航因子 $\rightarrow$ 性能因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持 $\rightarrow$ +关键技术 $\rightarrow$ +续航因子 $\rightarrow$ 性能因素 $\rightarrow$ +EV购买比例 $\rightarrow$ +EV购买量 $\rightarrow$ +EV保有量。

## 2 电动汽车保有量系统模型的构建

### 2.1 建立电动汽车保有量存量流量模型

电动汽车保有量因果关系图能很好反映系统各要素间的因果反馈关系,但不能进行定量的分析。在因果关系图模型的基础上进一步建立存量流量模型,通过系统仿真能够解决这个问题。综合电动汽车保有量因果图的分析,并结合不同变量的特点,确定CV保有量、EV保有量为水平变量, CV购买量、CV报废量、EV购买量、EV报废量等为流率变量,淘汰换购、新增汽车需求、汽车购买量、EV购买比例、基础设施要素、性能因素、使用因素、购买因素、消费者因素等为辅助变量。此外,将因果反馈回路中“CV保有量 $\rightarrow$ +碳排放 $\rightarrow$ +政策扶持”用时间函数来表示,后续变量作为时间函数的表函数来简化处理。建立的电动汽车保有量存量流量模型如图 3 所示。

## 2.2 系统动力学方程的建立

模型中基础设施因素、性能因素、使用因素、购买因素、消费者因素、续航因子、充电因子、安全因子、成本因子、车补因子等均为0~1的实数，这些变量呈非线性变化，其中消费者因素、续航因子、充电因子、安全因子、成本因子、车补因子等可通过时间的表函数方式进行处理。模型的主要动态方程如表1所示，表1中一些辅助因子采用幂指数的表达形式，自变量是影响因素，幂值为权重，本文通过采用层次分析法 (Analytic Hierarchy

Process, AHP)确定。

## 2.3 参数估计

本模型设置的仿真起始时间为2014年，2014—2018年间的仿真结果同现有数据比较进行历史检验，在有效性检验的基础上预测未来年电动汽车保有量，仿真电动汽车发展趋势。模型中的参数有初始值、常数值、表函数等，数值确定主要通过采用了统计资料、调查资料、数据拟合、专家评估以及专家研究成果等方式进行确定。对那些随时间变化不大的参数近似取常数值。

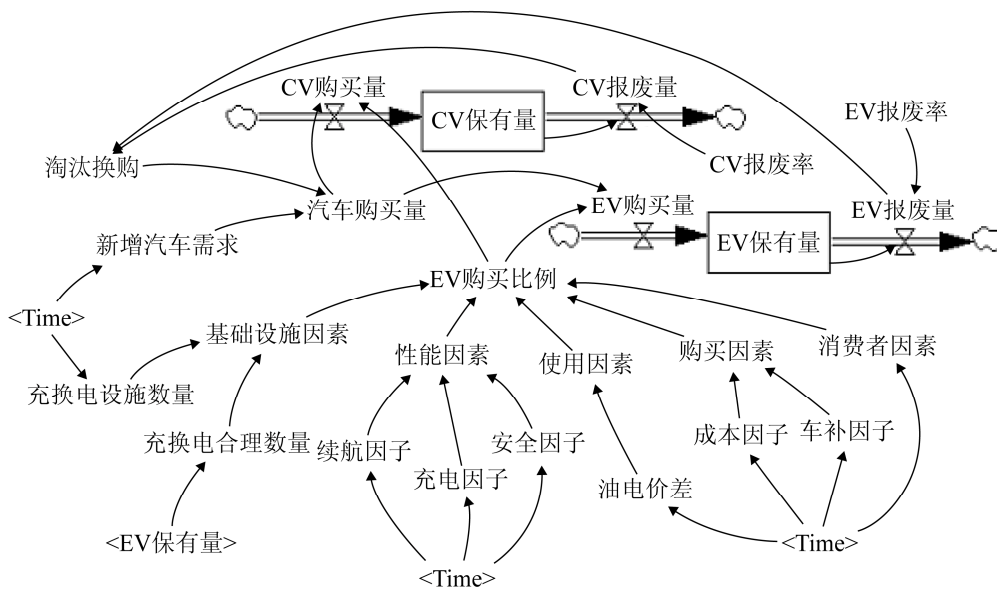


图3 电动汽车保有量存量流量模型

Fig. 3 Stock flow model of electric vehicle ownership

表1 电动汽车保有量模型主要动态方程

Tab. 1 Main dynamic equations of electric vehicle ownership model

变量类型	主要变量及方程
水平变量	EV保有量=INTEG (EV购买量-EV报废量,EV保有量初值) CV保有量=INTEG (CV购买量-CV报废量,CV保有量初值)
速率变量	EV购买量=汽车购买量*EV购买比例 EV报废量=EV保有量*EV报废率 CV购买量=汽车购买量*(1-EV购买比例) CV报废量=CV保有量*CV报废率
辅助变量	汽车购买量=新增汽车需求+淘汰换购 淘汰换购=CV报废量+EV报废量 EV购买比例=性能因素 <sup>0.35</sup> ×基础设施因素 <sup>0.3</sup> ×购买因素 <sup>0.15</sup> ×使用因素 <sup>0.2</sup> ×消费者因素 性能因素=安全因子 <sup>0.4</sup> ×充电因子 <sup>0.3</sup> ×续航因子 <sup>0.3</sup> 购买因素=成本因子 <sup>0.7</sup> ×车补因子 <sup>0.3</sup>

根据公安部相关数据, 本文电动汽车保有量初始值取 8 万辆, 传动汽车保有量初始值取 15 500 万辆。预估 CV 报废率为 0.1%, EV 报废率 0.15%。新增汽车需求用时间函数的表函数来处理, 2014—2018 年的新增汽车需求可用统计数据表示, 后面年份的数据采用专家评估等方法, 总体呈缓慢下降趋势, 按每 1 000 人 450 辆汽车、14 亿人口计算, 预估汽车保有量峰值为 6.3 亿辆。其他表函数表示方法及参数数据获得方法与之类似。

## 2.4 模型有效性验证

模型有效性验证主要验证模型与现实状况的符合程度。在建立电动汽车保有量存量流量模型及其方程与参数确定之后, 进一步对系统进行运行检验、历史检验等有效性验证。

### 2.4.1 运行检验

运行检验是指通过改变仿真步长的值来观察模型的仿真情况。如果仿真步长的调整会导致仿真结果变化很大, 可以认为模型存在运行问题。如果仿真结果不会因仿真步长改变而发生大的差异, 可以评估模型运行稳定。

本文分别将步长设置为 0.25, 0.5 和 1, 应用 Vensim PLE 软件进行仿真, 得到如图 4 所示的 EV 保有量的仿真比较结果。结果显示当仿真步长为 0.25, 0.5 和 1 时, EV 保有量模拟仿真曲线趋势和数据都没有明显的变化, 表明建立的系统动力学模型运行问题不会出现病态结果。

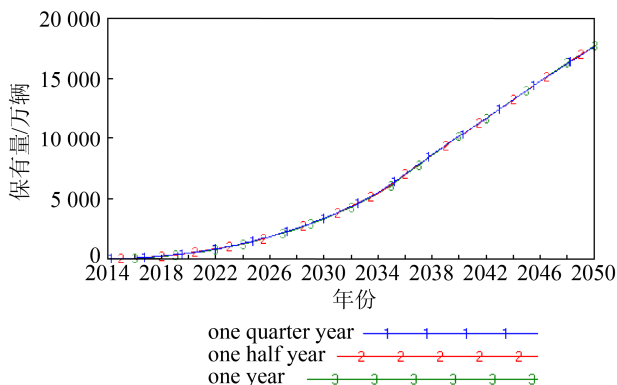


图 4 EV 保有量比较图

Fig. 4 Comparison of EV ownership

### 2.4.2 历史检验

历史检验是将模型仿真结果与真实历史数据进行比较, 计算出主要变量仿真结果与实际数据之间的相对误差, 如果相对误差数据较小, 可认为建立的模型有效性良好。相对误差计算公式为:

$$\text{相对误差} = (\text{仿真值} - \text{实际值}) / \text{实际值} \quad (1)$$

本文以 2015—2018 年汽车保有量以及 EV 保有量真实历史数据作为参照, 对照模型仿真结果进行历史检验, 检验结果如表 2~3 所示。

表 2 EV 保有量预测值与真实值比较

年份	历史数据/万辆	仿真数据/万辆	误差率/%
2015	33	33.35	1.06
2016	73	73.85	1.16
2017	125	126.81	1.45
2018	211	211.72	0.34

表 3 汽车保有量预测值与真实值比较

年份	历史数据/亿辆	仿真数据/亿辆	误差率/%
2015	1.75	1.70	-2.86
2016	1.95	1.90	-2.56
2017	2.17	2.10	-3.23
2018	2.40	2.32	-3.33

由表 2~3 可知, EV 保有量和汽车保有量的仿真值与历史数据的相对误差率均不超过  $\pm 4\%$ , 可以说本模型历史检验的拟合度良好。应用模型进行仿真, 仿真数据能够代表新能源电动汽车的发展趋势。

## 3 电动汽车保有量系统仿真分析

在电动汽车保有量模型有效性得到验证后, 进一步展开系统仿真分析, 探索新能源电动汽车发展趋势及主要影响因素。

### 3.1 电动汽车保有量分析

在 Vensim PLE 中, 设置模型的仿真起始时间为 2014 年, 结束时间为 2050 年, 仿真步长为 1 年, 通过模型仿真, 得到 EV, CV 保有量仿真曲线以及仿真数据如图 5 和表 4 所示。



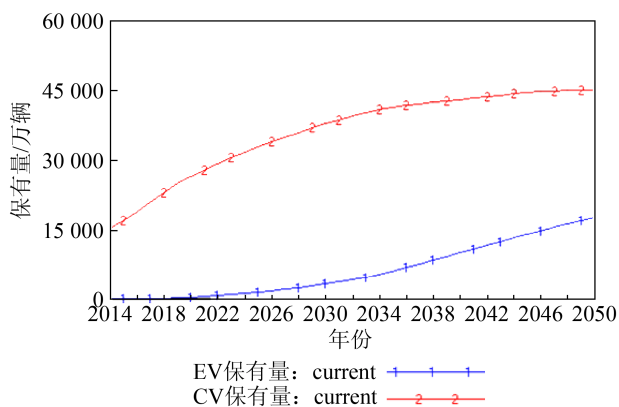


图5 EV, CV保有量仿真曲线

Fig. 5 Simulation curve of EV and CV holdings

表4 电动汽车保有量

Tab. 4 Electric vehicle ownership /万辆

年份	EV保有量	CV保有量	年份	EV保有量	CV保有量
2019	332.92	25 175	2035	6 076	41 331
2020	455.69	26 552	2036	6 929	41 678
2021	610.64	27 897	2037	7 759	42 028
2022	793.23	29 214	2038	8 571	42 376
2023	1 005	30 502	2039	9 371	42 716
2024	1 239	31 668	2040	10 164	43 043
2025	1 506	32 801	2041	10 953	43 354
2026	1 807	33 900	2042	11 734	43 653
2027	2 137	34 950	2043	12 511	43 936
2028	2 499	35 948	2044	13 287	44 200
2029	2 892	36 895	2045	14 063	44 444
2030	3 320	37 787	2046	14 844	44 663
2031	3 784	38 623	2047	15 606	44 821
2032	4 279	39 408	2048	16 351	44 916
2033	4 805	40 142	2049	17 080	44 947
2034	5 404	40 783	2050	17 792	44 915

从图5可以看出, EV保有量呈逐年增长态势, 刚开始电动汽车增长率比较高, 主要是因为购车补贴作用的影响, 补助标准退坡会使增长速度放缓, 随着续航里程、充电时间等关键技术性能不断提高, 以及电动汽车在许多方面趋于成熟, 电动汽车越来越得到市场的认可, EV保有量会开始并保持一个高速增长态势, 这也符合国家相关政策的导向和本文对电动汽车增长趋势的预估。由于经济的发展, 汽车的保有量总体呈上升态势, 在仿真前期, 在EV保有量少, 的情况下, CV保有量数据基本与汽车保有量趋势基本一致。随着时间推移,

总的汽车保有量数据增长会放缓, 加上EV保有量数据增长很快, CV数据量曲线明显有放缓, 趋平、下降的态势。

从表4可以看出, EV保有量数据一直保持增长的趋势, 预估2020年接近500万辆, 2025年前后达1 500万辆, 2030年前后达3 000万辆, 2040年突破1亿。而CV保有量数据方面, 2040—2050期间保有量数据在4.3~4.5亿辆之间, 并在期间产生了峰值, 说明从2040年开始CV保有量数据增长很慢, 逐步到达极限后转趋下降。

### 3.2 电动汽车主要影响因素分析

图6所示的仿真图列出了EV保有量、基础设施因素、性能因素、消费者因素、使用因素、车补因子的发展趋势。通过对图6的分析, 不难得出下面的一些结论:

(1) 车补因子逐年下降, 反映了购车补贴退坡的现状。在电动发展前期, 由于电动汽车产业规模小, 政府补贴有效推动了电动汽车产业的起步和高速发展, 是电动汽车发展的主要力量。但随着电动汽车产能的增加, 政府补贴逐步退出, 短时间会有一定影响, 但不会改变电动汽车产业长期发展的趋势。

(2) 基础设施因素即充换电基础设施的建设对电动汽车发展尤其是起步期发展是一个约束, 人们往往会因为充电便利性而影响购车的意愿, 需要加快基础设施的建设。电动汽车产业发展与基础设施因素是正相关关系, 基础设施网络进一步完善之后, 其对电动汽车发展的影响作用逐步减少。

(3) 性能因素指续航里程、充电时间、安全性等关键技术性能, 它们在相当长时间内都是电动汽车的发展瓶颈。这些关键技术性能指标值持续不断地突破, 也给电动汽车产业高速发展带来了助力。

(4) 使用因素代表相较于传统汽车而言电动汽车带来的使用成本的降低。在电动汽车产业的早期发展阶段, 电动汽车的营销面对的是相对低端的消费者, 购买补贴和使用成本较低是吸引他们的最主要因素, “买得起, 用得起”是电动汽车产业发展的



早期动力。随着时间推移,化石能源日益枯竭,油价价差会越来越大,使用经济性成为影响电动汽车产业发展的长期影响因素。

(5) 电动汽车产业发展早期,国内电动车关键

技术水平、基础设施建设都比较落后,依靠补贴进行销售,口碑不佳,影响消费者的购买意愿。随着电池等关键技术的突破、基础设施的完善,国内电动汽车将不再代表低端,消费者认可度稳步上升。

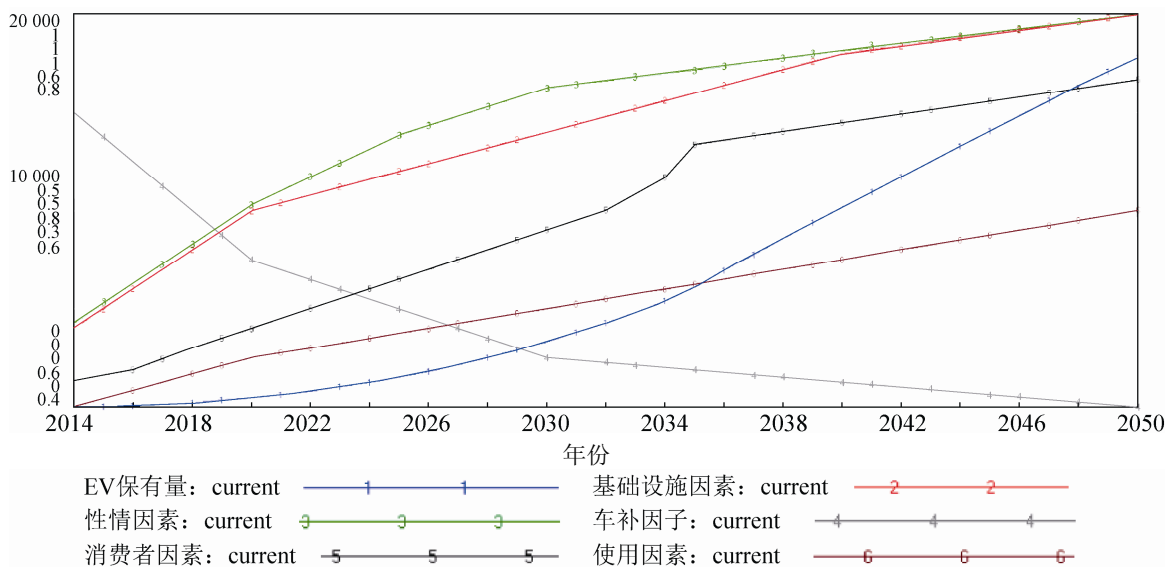


图6 EV发展趋势与主要影响因素

Fig. 6 EV development trends and main influencing factors

## 4 结论

本文基于系统动力学,构建电动汽车保有量的系统动力学模型,对电动汽车发展趋势与主要影响因素进行了模拟仿真分析。通过模拟分析,对推进电动汽车发展提出以下建议:

(1) 政府对电动汽车的补贴退坡只是补贴模式的更改,有关部门应组织创新新的电动汽车产业补贴方式。后续,政府更应该在充换电基础设施建设、动力电池回收体系建设、动力电池等关键技术攻关、新能源消费市场培育等方面,给予更多的政策扶持。

(2) 现阶段关键技术是制约新能源电动汽车发展的主要因素,政府应鼓励产学研用协同创新联合攻关,企业间可以相互间强强联合,也可以与大学、科研机构协同合作。这种产学研用联合开发的模式能够节省成本、提高效率,突破关键技术障碍,促进新能源电动汽车产业的跨越式发展。

(3) 坚持统筹规划、科学布局的原则,因地制

宜、适度超前,加快推进充换电基础设施建设。加快开展充换电设施技术、建造、运营的标准化工作,提高设施的通用性和开放性。充分发挥市场主导作用,通过推广政府和社会资本合作模式、给予相关投资方一定的财政补贴、大型充电站与商业地产相结合等方式,引导社会资本参与充换电基础设施体系建设运营。

(4) 增加消费者对新能源电动汽车的认可度,大力培育国内新能源电动汽车消费市场。一方面政府、企业和各类社会团体充分利用公交广告、新闻媒体、互联网络、各种会议和培训等渠道,普及新能源汽车节能环保特性,形成有利于新能源汽车产业发展的舆论氛围。另一方面政府通过政策扶持促进新能源电动汽车的示范推广,提高消费者对新能源电动汽车的消费认知度。

研究发现,电动汽车发展是一个复杂的非线性系统,具有动态性特征,而目前研究多从静态视角着手。因此,基于系统动力学理论,模拟和探索新

能源电动汽车动态发展规律,有助于丰富电动汽车发展的研究方法。

本研究存在不足之处,尽管有通过有效性验证来证明模型的可靠性,但模型变量、模型方程、参数设计等取决于研究者对于被研究系统的理解,具有一定的主观性。后续研究应注重对实际案例的调查分析,优化模型变量和参数,进而建立更为系统和全面的研究模型。

### 参考文献:

- [1] 乔英俊, 延建林, 钟志华, 等. 我国汽车产业转型升级研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 41-46.  
Qiao Yingjun, Yan Jianlin, Zhong Zhihua, et al. Transformation and Upgrading of Automobile Industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(3): 41-46.
- [2] 世界新能源汽车大会组委会. 世界新能源汽车大会博鳌共识[J]. 科技导报, 2019, 37(14): 105.  
Organizing Committee of World New Energy Vehicle Conference. Boao Consensus on World New Energy Vehicle Conference[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(14): 105.
- [3] 唐葆君, 王翔宇, 王彬, 等. 中国新能源汽车行业发展水平分析及展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(2): 6-11.  
Tang Baojun, Wang Xiangyu, Wang Bin, et al. Analysis and Prospect of China's New Energy Vehicles Industry Development Level[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(2): 6-11.
- [4] 马建, 刘晓东, 陈轶嵩, 等. 中国新能源汽车产业与技术发展现状及对策[J]. 中国公路学报, 2018, 31(8): 1-19.  
Ma Jian, Liu Xiaodong, Chen Yisong, et al. Current Status and Countermeasures for China's New Energy Automobile Industry and Technology Development[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(8): 1-19.
- [5] 岳为众, 张晶, 刘颖琦. 产业政策与市场表现关联研究——以中国电动汽车充电基础设施为例[J]. 经济与管理研究, 2019, 40(2): 82-94.  
Yue Weizhong, Zhang Jing, Liu Yingqi. Research on the Relationship Between Industrial Policy and Market Performance—Case of China's Electric Vehicle Charging Infrastructure[J]. Research on Economics and Management, 2019, 40(2): 82-94.
- [6] 刘颖琦, 张晶, 岳为众, 等. 网络关系视角下电动汽车充电基础设施产业链演进[J]. 中国科技论坛, 2019(1): 66-79.  
Liu Yingqi, Zhang Jing, Yue Weizhong, et al. Industry Chain Evolution of Electric Vehicles Charging Infrastructure from the Perspective of Network Relationship[J]. Forum on Science and Technology in China, 2019(1): 66-79.
- [7] 郭向伟, 康龙云, 张崇超. 我国电动汽车产业关键技术现状发展研究[J]. 电源技术, 2018, 42(6): 915-917.  
Guo Xiangwei, Kang Longyun, Zhang Chongchao. Research on Status and Development of the Key Technologies of Electric Vehicle Industry in China[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2018, 42(6): 915-917.
- [8] 王江, 王光辉. 中国电动汽车技术演进分析: 行动者网络视角[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(11): 60-68.  
Wang Jiang, Wang Guanghui. A Study on the Evolution of Electric Vehicle Technology in China: Actor Network Perspective[J]. Science & Technology Progress and Policy, 2018, 35(11): 60-68.
- [9] 肖成伟, 汪继强. 电动汽车动力电池产业的发展[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 74-83.  
Xiao Chengwei, Wang Jiqiang. An Overview of Development Status of Traction Battery Industry for Electric Vehicles[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(6): 74-83.
- [10] 缪小明, 刘啦. 基于系统动力学的电动汽车产业化政策研究[J]. 软科学, 2015, 29(8): 33-38.  
Miao Xiaoming, Liu La. Study on Industrialization Policy of the Electric Car Based on System Dynamics[J]. Soft Science, 2015, 29(8): 33-38.
- [11] 陈坤. 纯电动汽车产业政策调整研究[J]. 上海经济研究, 2016(12): 53-60.  
Chen Kun. Research on Chinese Industrial Policy of Pure Electric Vehicle[J]. Shanghai Journal of Economics, 2016(12): 53-60.
- [12] 陈成沐. 运用价格杠杆推动电动汽车行业发展的战略思考[J]. 价格理论与实践, 2017(6): 63-65.  
Chen Chengmu. The Strategic Thinking of Using Price Leverage to Promote the Development of Electric Vehicle Industry[J]. Price: Theory & Practice, 2017(6): 63-65.
- [13] 陈翌, 尤建新, 薛奕曦, 等. 面向电动汽车产业发展的政企合作博弈研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 440-446.  
Chen Yi, You Jianxin, Xue Yixi, et al. Cooperative Game Between Electric Vehicles Manufacturers and Government for Electric Vehicles Industry Development[J]. Journal of Tongji University (Natural

- Science), 2017, 45(3): 440-446.
- [14] 姜威, 霍国庆. 基于产业链变革的区域电动汽车产业竞争力研究——以北京、深圳为例[J]. 管理现代化, 2016, 36(4): 48-51.  
Jiang Wei, Huo Guoqing. Research on Regional Electric Vehicle Industry Competitiveness Based on Industry Chain Reform—Take Beijing and Shenzhen as examples[J]. Modernization of Management, 2016, 36(4): 48-51.
- [15] 刘娟娟, 王鹏, 苗广雁. 基于“互联网+”的电动汽车充电产业商业模式研究[J]. 企业经济, 2016(4): 148-152.  
Liu Juanjuan, Wang Peng, Miao Guangyan. Research on Business Model of Electric Vehicle Charging Industry Based on “Internet+”[J]. Enterprise Economy, 2016(4): 148-152.
- [16] 周昊, 刘俊勇, 刘友波, 等. 基于系统动力学的电动汽车规模推演分析与仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 1-7.  
Zhou Hao, Liu Junyong, Liu Youbo, et al. Analysis and Simulation of Electric Vehicles Scale Evolution Based on System Dynamics[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(8): 1-7.
- [17] 侯兵, 俞宁, 周康渠. 纯电动汽车发展规模的系统动力学分析与仿真[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(12): 23-29, 40.  
Hou Bing, Yu Ning, Zhou Kangqu. System Dynamic Analysis and Simulation of Pure Electric Vehicle Development Scale[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(12): 23-29, 40.
- [18] 芦兴, 方扬. 基于系统动力学模型的我国电动汽车发展规模及充电负荷预测[J]. 华东电力, 2014, 42(11): 2349-2354.  
Lu Xing, Fang Yang. EV Development Scale in China and Charging Load Forecasting Based on System Dynamics Model[J]. East China Electric Power, 2014, 42(11): 2349-2354.
- [19] 王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.  
Wang Qifan. System Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [20] 冯云廷, 张娜. 城市产学研协同创新的系统动力学研究方法及其提升路径探析——一个理论框架[J]. 科技管理研究, 2018, 38(18): 1-8.  
Feng Yunting, Zhang Na. Research on Promotion Path of Collaborative Innovation of Urban Industry-University-Research Institute Base on System Dynamics Research Method[J]. Science and Technology Management Research, 2018, 38(18): 1-8.