

基于组合成本估算法的农村充电配套设施投资路径研究

秦世伟^{1,2}, 王 鹏², 刘 辉¹, 崔正湃³, 刘晓雪³, 刘洪涛²

(1. 广西大学电气工程学院, 广西南宁 530004; 2. 华北电力大学国家能源战略发展研究院, 北京 102206; 3. 国网冀北电力有限公司, 北京 100054)

摘 要:随着新能源汽车下乡政策推进,大量电动汽车充电负荷接入农村配电网,农村配套充电基础设施建设需求激增。为合理规划投资建设路径,提出了一种基于新能源汽车保有量预测的农村充电配套设施成本估算法。首先采用改进Bass扩散模型,预测未来5年农村新能源汽车保有量变化。其次,提出结合指标概算定额法和单元指标估算法的混合估算法,基于保有量预测结果,对典型场景整体工程投资成本进行测算。最后,选取冀北5市进行了算例分析,分析农村配套充电基础设施在保守、常规、激进3个情景下的投资建设需求。结果表明所提方法能够较为准确地估算农村充电配套设施投资规模。

关键词:新能源汽车下乡; 充电基础设施; Bass模型; 投资成本

中图分类号: TM910.6; F542

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.06008

Investment Pathways for Rural Charging Infrastructure Based on A Combined Cost Estimation Method

QIN Shiwei^{1,2}, WANG Peng², LIU Hui¹, CUI Zhengpai³, LIU Xiaoxue³, LIU Hongtao²

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. National Institute of Energy Development Strategy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Beijing 100054, China)

Abstract: With the advancement of new energy vehicle (NEV) adoption policies in rural areas, a substantial influx of electric vehicle charging loads is being integrated into rural power distribution networks, driving a surge in demand for supporting charging infrastructure. To rationally plan investment and construction pathways, this paper proposes a combined cost estimation method for rural charging infrastructure based on NEV ownership projections. First, an improved Bass diffusion model is introduced to predict rural NEV ownership over the next five years. Second, a hybrid estimation method combining norm-based and unit index approaches is developed to calculate the total investment costs for typical scenarios, grounded in the ownership prediction results. Finally, a case study of five cities in northern Hebei Province is conducted to analyze investment requirements under conservative, moderate, and aggressive scenarios. Results indicate that the proposed method can accurately estimate the investment scale for rural charging infrastructure.

Key words: new energy vehicle adoption in rural areas; charging infrastructure; Bass model; investment cost

0 引言

新能源汽车是全球汽车产业转型、绿色发展的主要方向。习近平总书记强调,发展新能源汽车是

我国从汽车大国迈向汽车强国的必由之路。此外,相关文件指出,要在广大农村地区适度超前建设充电基础设施。当前农村充电基础设施时空布局错位、利用效率低,未来一段时期相应的配电网建设改造成本及公共充电桩建设成本将大幅提升^[1-6],同时缺少清晰的充电基础设施建设投资需求测算方法,推进路径不清晰。因此,研究新能源汽车下乡配套的充电基础设施建设及配电网建设投资规模估算,对电网企业及充电站运营商未来投资决策具有重要

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(23BGL308); 国家重点研发计划(2022YFE0129400)

Project Supported by National Social Science Fund of China (23BGL308); National Key R&D Program of China (2022YFE0129400)

的意义。

现阶段,国内外学者围绕新能源汽车保有量预测及工程项目投资估算2个议题已经进行了诸多研究。本文将从以下维度展开文献述评。

以时间为序列是当前新能源汽车保有量预测研究的主流方向,其中有部分研究采用人工智能模型对新能源汽车保有量进行预测。文献[7]利用萤火虫算法来优化灰色模型参数的选取,进而对电动汽车保有量进行预测。文献[8]采用最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LSSVM)机器学习方法在考虑多因素影响下对电动汽车保有量进行预测,对于模型参数整定问题,通过引入黏菌优化搜索算法来解决。文献[9]结合长短时记忆神经网络模型和系统动力学模型2种方法对城市电动汽车保有量进行预测,并对2种预测方法的结果进行加权组合,使得长期预测与短期预测结果精准度均得到提升。此外,也有部分研究应用诸如 Logistic, Gompertz 及 Bass 等传统扩散模型对机动车保有量进行预测^[10-13]。文献[7-13]提出的预测方法均依赖历史数据支撑,而农村新能源汽车保有量基数极小,缺乏历史统计数据,因此无法直接应用类似方法进行预测。

在工程项目投资估算方面,当前研究采用的方法主要分为自上而下和自下而上2大类。自上而下的方法均是基于各类人工智能方法,如反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)^[14]、支持向量机^[15]、案例推理法^[16]、最小支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LSSVM)^[17]等,这些方法均基于历史工程数据的机器学习,通过训练好的模型实现工程投资规模的估算。自下而上的方法主要包括指标定额估算法及直接成本法^[18],这2类方法适用于体量较小的工程估算。文献[18]总结了投资估算的相关方法,指出对于建安工程费的估算适合使用具有准确性和权威性特点的指标估算法。文献[19]采用直接成本法测算了某屋顶光伏项目所需的投资规模。

文献[7-19]为新能源汽车保有量预测与工程投资估算提供了思路和方法,但并不适用于缺乏各类历史数据的农村新能源汽车配套充电基础设施及配电网建设投资规模的估算。一方面,农村新能源汽车保有量历史数据缺位,无法直接应用依赖历史数据的保有量预测方法;另一方面,农村充电基础设施工程投资案例较少。基于此,本文在预测新能源汽车保有量基础上,围绕农村配套充电基础设施

及配电网建设,开展投资规模测算。本文的主要贡献为:一是提出了逐年输入参量递推的改进 Bass 扩散模型,其可在不依赖历史数据的前提下预测农村新能源汽车保有量;二是结合估算工程特性,提出了由典型场景到整体工程的组合投资成本估算方法。以冀北地区实际情况为算例进行了测算,对投资成本的相关影响因素进行了分析,为其他地区提供借鉴。

1 基于改进 Bass 扩散模型的农村电动汽车保有量预测方法

家用电动汽车属于一般耐用品范畴。本节采用 Bass 扩散模型对农村地区电动汽车保有量规模进行预测。

1.1 常规 Bass 扩散模型

常规 Bass 扩散模型通过将潜在消费者区分为“创新者”和“模仿者”2类,对某一耐用品的市场占有规模进行预测。其一般形式为:

$$F_t = m \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 - \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (1)$$

式中: F_t 为 t 时刻商品的销售量; p 为创新系数; q 为模仿系数; m 为市场最大潜量。

1.2 改进的 Bass 扩散模型

本文以农村地区为研究对象,构建改进的变参数 Bass 递推扩散模型,在对3个输入参数进行逐年设定后,以年为步长逐年对保有量进行递推预测。因此可将式(1)还原为式(2)。

$$\begin{cases} F(t) = \int_0^t f(t) dt, F(0) = 0 \\ f(t+1) = (p + q \times F(t)) \times (1 - F(t)) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(t)$ 为 t 时刻商品的购买概率; $f(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻商品的购买概率; $F(t)$ 为 t 时刻该商品的累计购买比例; $F(0)$ 为初始时刻的累计购买比例; p_t, q_t, m_t 分别为 t 时刻的创新系数、模仿系数和市场最大潜量。

结合式(3)表示的新能源汽车保有量计算方法,可将常规 Bass 扩散模型进一步变换为式(4)所示的改进变参数递推 Bass 扩散模型。

$$N_T = m_T \cdot F(T) \quad (3)$$

$$N_T = N_{T-1} + p_T(m_T - N_{T-1}) + q_T \frac{N_{T-1}}{m_T} (m_T - N_{T-1}) \quad (4)$$

式中: N_T, N_{T-1} 分别为第 $T, T-1$ 年的新能源汽车保有量; $F(T)$ 为第 T 年的新能源汽车的累计购买比例;

p_T, q_T, m_T 分别为第 T 年的创新系数、模仿系数和市场最大潜量。

农村地区电动汽车的最大市场潜量由家用车年均增量以及存量换新部分组成。每年的市场最大潜量为：

$$m_T = H_{T-1} \cdot \beta + (H_T - H_{T-1}) \quad (5)$$

式中： H_T, H_{T-1} 分别为第 $T, T-1$ 年农村家用车保有量； β 为存量家用车的年均换新率。

对于创新系数、模仿系数，本文采用类比经验估计法对其进行设定^[20]。创新系数 p 将在一定阶段快速增长进而不断增大，并且随着未来时间的延长，由市场规律可以推断 p 值增速会较低^[20-22]。模仿系数 q 随着电动汽车在农村地区保有量的增大，将不断增大，并且在农村地区这种效应会更加明显^[23]，由市场规律可知 q 值增速会增高，最终趋于平稳。

2 组合成本估算方法

本文将农村充电基础设施及其相应配电设施的投资成本估算分为村级家用慢充设施和乡镇级集中快充设施 2 部分。组合估算方法实施流程如图 1 所示。对于这 2 部分投资，均采用由典型到普遍的估算思路，结合第 1 节预测结果及区域农村实际情况，通过构建村（乡镇）典型场景，并分析其充电配套设施需求，估算典型场景的投资成本，最终推广到整个区域。

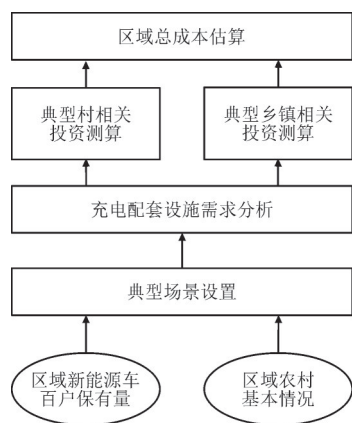


图1 组合估算方法实施流程

Fig.1 Implementation process of combined estimation method

2.1 典型场景及充电配套设施需求模型

本文以区域平均每村、每乡镇新能源车保有量为参考，构建相应典型场景。新建充电配套设施需求按式(6)计算。

$$\begin{cases} K_{cdz} = \bar{n} \cdot \lambda \\ P = \eta \cdot (K_{cdz} \cdot P_{rd}) \end{cases} \quad (6)$$

式中： K_{cdz} 为典型场景建设充电桩需求； $\bar{n}$ 为典型场景新能源汽车保有量； λ 为配桩率； P 为新增充电负荷； η 为充电同时率； P_{rd} 为单桩功率。

2.2 典型场景成本测算

本文对典型场景的成本采用指标概算定额法进行测算。该方法是指将一个完整工程划分为多个单项工程，基于各单项工程成本进行逐项精确测算，最终汇总得出项目总成本。具体计算方法为：

$$C_{typ,k} = \sum_{i=1}^2 C_{k,i} \quad (7)$$

式中： $C_{typ,k}$ 为第 k 个（其中 k 取村庄 vil 或乡镇 cnt）典型场景的总投资成本； $C_{k,i}$ 为第 k 个典型场景中第 i 个单项工程的投资成本。

当 k 取 vil 时为典型农村成本，该部分包含入户接线工程、新建配电变压器及其线路工程。各项工程的成本为：

$$\begin{cases} C_{vil,1} = C_{sl} + C_{db} + C_{fl} + C_{dy} \\ C_{vil,2} = C_{TR} + C_{sl} + C_{gt} + C_{dlq} + C_{dy} \end{cases} \quad (8)$$

式中： $C_{vil,1}, C_{vil,2}$ 分别为入户接线工程、新建配电变压器及其线路成本； $C_{sl}, C_{db}, C_{fl}, C_{TR}, C_{gt}, C_{dlq}, C_{dy}$ 分别为线路、电表、辅料、变压器、杆塔、断路器和定额成本。

当 k 取 cnt 时为典型乡镇成本，包含集中式充电站的建设工程和专用配电变电站接入工程。各项工程的成本为：

$$\begin{cases} C_{cnt,1} = C_{cdz} + C_{dy} \\ C_{cnt,2} = C_{TR} + C_{sl} + C_{gt} + C_{dy} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $C_{cnt,1}, C_{cnt,2}$ 分别为集中式充电站的建设投资及专用配电变电站接入投资； C_{cdz} 为充电桩成本。

2.3 全区域成本估算

基于典型场景的区域整体投资估算可采用单元指标估算法，将一个项目划分为若干个相对独立的单元化模块，各个模块可以是功能模块、子系统、项目阶段任何可划分并具备独立性的部分。

本文在单元指标估算法基础上，进一步对典型场景测算结果进行调整。村一级投资估算应结合实际情况设置新建配电变压器的比例；乡镇集中式充电站配桩数问题，应进一步区分以镇为代表的城镇融合片区以及乡为代表的农村融合片区，城镇融合片区按典型乡镇配桩数估算，农村融合片区应以典型乡镇半数来配桩^[24]。具体估算方法如式(10)：

$$C_{SUM} = n_1 \cdot \mu \cdot C_{typ,1} + n_1 \cdot (1-\mu) \cdot C_{typ,1}^* + n_2 \cdot C_{typ,2} + n_3 \cdot C_{typ,2}^* \quad (10)$$

式中： C_{SUM} 为总的投资估算； n_1, n_2, n_3 分别为总村庄

数、总镇数、总乡数; μ 为需要新建配电变压器的村庄占比; $C_{typ,1}^*, C_{typ,2}^*$ 分别为无需新建配电变压器的典型村投资数、配桩数为典型乡镇场景一半的投资数。

3 算例分析

本文选取冀北 5 市农村地区作为目标区域,以 2021 年为基准年,以 2030 年为目标年进行测算。冀北 5 市农村基本情况如表 1 所示。

表 1 冀北 5 市农村基本情况
Table 1 Basic information of rural areas in five cities of northern Hebei

项目	户数/万户	村委会数/个	村均户数/户	乡镇个数/个	乡镇均户数/户
A	159.4	5 313	300	231	6 901
B	74.9	2 265	331	97	7 720
C	110.9	4 173	266	233	4 760
D	102.4	2 459	416	217	4 718
E	96.0	3 203	300	108	8 887
总数	543.6	17 413	312	886	6 135

3.1 农村新能源汽车保有量预测

根据测算可知截至 2021 年底冀北 5 市农村地区共有家用车 238.1 万辆^[25]。同理分析冀北 2015 年到 2021 年农村家用车保有量数据可知农村家用车保有量每年递增约 18 万辆。截至 2021 年底,河北省新能源汽车在私家车中占比 1.55%,因此本文认为冀北 5 市农村新能源汽车保有量占比约为 1%,即 2.38 万辆。对于每年存量家用车更新的数量,根据调研本文假设更新率为 10%。

根据文献[20],创新系数 p 的经验区间在 0.01~0.03,模仿系数 q 的经验区间在 0.3~0.7,并且鲜有大于 0.5 的情况。此外,一方面结合文献[20]对农村机动化发展历程的解析,以及《关于加快充电基础设施建设更好支持新能源汽车下乡和乡村振兴的实施意见》提出的 2030 年农村充电配套设施的发展目标,可以得出以下结论:2021—2030 年是农村新能源汽车保有量增长的主要加速期,2030 年后新能源汽车在农村地区的保有量增长将会趋于稳定;另一方面考虑农村居民的个体消费行为会受到意见领袖和参照群体更大的影响^[23],因此扩散模型的模仿系数应略大于城市地区。综上,本文基于文献[20]的参数设置,在改进的 Bass 扩散模型算例中,将创新系统与模仿系数划分为保守、常规、激进 3 组,并

分别对冀北农村新能源汽车保有量进行预测。具体输入参量及市场最大潜量见表 2。

表 2 Bass 模型相关参数
Table 2 Parameters related to Bass model

年份	创新系数			模仿系数			最大市场潜量/万辆
	保守	常规	激进	保守	常规	激进	
2021	0	0	0.003	0.33	0.33	0.33	41.8
2022	0.001	0.002	0.005	0.33	0.33	0.365	43.6
2023	0.001 5	0.003	0.013	0.34	0.365	0.39	45.4
2024	0.002 5	0.005	0.016	0.35	0.39	0.42	47.2
2025	0.006	0.013	0.019	0.36	0.42	0.455	49
2026	0.008	0.016	0.021	0.38	0.455	0.495	50.8
2027	0.009	0.019	0.023	0.4	0.495	0.54	52.6
2028	0.012	0.021	0.025	0.43	0.54	0.59	54.4
2029	0.013	0.023	0.028	0.45	0.59	0.6	56.2
2030	0.015	0.025	0.03	0.48	0.6	0.6	58

根据本文构建模型及相应数据,可以预测出到 2030 年底,常规情景下冀北 5 市农村家用车保有量将达 400 万辆,新能源汽车保有量将达 38.47 万辆,共计占总家用车保有量的 9.6%;在激进和保守情景下新能源汽车的保有量分别为 44.3 万辆和 29.37 万辆,共计占总家用车保有量分别为 11.1% 和 7.3%,详见图 2。在常规情景下,预测结果与全国相应水平年数据吻合。

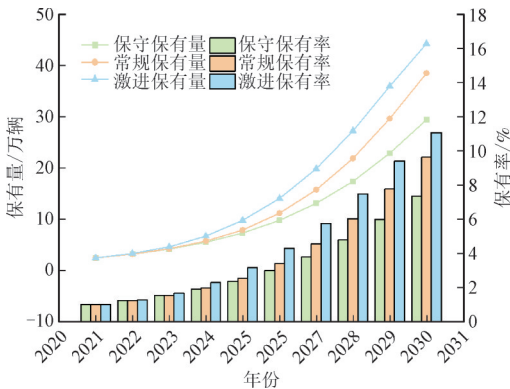


图 2 冀北农村新能源汽车保有量预测结果
Fig.2 Forecast results of new energy vehicle ownership in rural northern Hebei

根据预测结果,可以计算出在常规情景下到 2030 年底,冀北 5 市农村地区的百户新能源汽车保有量约为 7.12 万辆。

3.2 冀北农村充电配套设施投资成本估算

3.2.1 冀北典型场景设置

基于冀北 5 市农村现状及 2030 年百户新能源车保有量预测数据,可计算得出冀北 5 市各村镇新能源车保有量,进而构建典型村、典型乡镇场景。具体结果见表 3。

表3 冀北5市平均各村、各乡镇新能源车保有量
Table 3 Average new energy vehicle ownership per village and township in five cities of northern Hebei

项目	村均新能源车/辆	村均新增充电负荷/kW	乡镇平均新能源车/辆	配桩数/个	乡镇新增充电负荷/kW
A	21	168	492	9	540
B	24	192	550	11	660
C	19	152	339	7	420
D	30	240	336	7	420
E	21	168	633	13	780
冀北	22	176	437	8	480

本算例涉及的参量和测算指标如表4和表5所示。

表4 冀北算例部分特征参量
Table 4 Partial characteristic parameters of northern Hebei case study

参量	数值
村充电同时率	0.8
村入户接线距离/m	300
乡镇充电同时率	1
变压器接线距离/km	5
设计费率	0.04

表5 冀北算例测算指标
Table 5 Calculation metrics for northern Hebei case study

指标	单价
0.4 kV 线路	5 元/m
10 kV 线路(JL/G1A-50/8)	160 000 元/km
10 kV 线路(JL/G1A-95/15)	190 000 元/km
绝缘子	35/片
金具	5 000/t
电表	120/块
架户横担	30/根
空气开关	20/个
高压断路器/台	75 000
60 kW 直流充电桩	20 000/根
10 kV 柱上变压器(400 kVA)	120 000/台
10 kV 柱上变压器(200 kVA)	10 000/台
10 kV 箱式变压器(630 kVA)	390 000/台
10 kV 箱式变压器(4 000 kVA)	330 000/座
直流充电桩安装调试费	864.55
接户线安装定额成本	149.02

表5中10 kV线路、变压器及断路器成本中均已包含对应的场地费和定额成本。

3.2.2 冀北典型村场景测算

设置典型村有新能源汽车22辆,即新增充电负荷176 kW,因此需新建1台容量200 kVA的10 kV

变压器,且认为上一级变电站有充足的可开放容量。基于该设置,基于模型测算可得相应的投资成本为1 235 677元。典型村具体测算结果如表6所示。

表6 典型村成本测算结果
Table 6 Cost calculation results for typical villages 元

项目	投资
线路 C_{sl}	33 000
入户接线工程 辅料 C_{fl}	30 316
定额 C_{dy}	9 835
变压器 C_{TR} +定额 C_{dy}	100 000
新建配电变压器及线路工程 线路 C_{sl} +定额 C_{dy}	950 000
断路器 C_{dlq} +定额 C_{dy}	75 000
设计	47 926.04
合计	1 246 077

3.2.3 冀北典型乡镇场景测算

设置典型乡镇需建设单桩功率为60 kW的直流快充桩8个,即新增最大负荷480 kW,因此需新建1台630 kVA箱式变电站,同时假设上一级变电站有充足的可开放容量。基于模型测算可得相应的投资成本为1 411 193元。具体如表7所示。

表7 典型乡镇成本测算结果
Table 7 Cost calculation results for typical townships 元

项目	投资
变电站 C_{TR}	390 000
集中式充电桩的建设工程 充电桩 C_{cdz}	160 000
定额 C_{dy}	6 916
专用配电变电站接入工程 线路 C_{sl} +定额 C_{dy}	800 000
设计	54 276.64
合计	1 411 193

3.2.4 冀北农村地区配套充电设施投资估算

本文设定全冀北地区30%的村庄需要新建配电变压器以满足新能源汽车充电负荷增量。乡镇公共充电桩投资规模参照典型场景测算方法,其余类别充电桩投资可类推估算。具体参数见表8。

表8 各类别集中式充电桩投资数额
Table 8 Investment amounts for centralized charging stations by category

类别	1 桩	2 桩	3 桩	4 桩
单价/万元	92.6	97.9	102.2	126.1
类别	6 桩	7 桩	8 桩	10 桩
单价/万元	136.8	138.9	141.1	173.5

综上,本文以冀北农村地区平均水平为基准测算了2025—2030年为满足不同情景下冀北农村地区逐年农村充电需求,建设配套设施的总投资数

额,具体见图 3。其中,满足常规情景下 2030 年农村充电需求的投资估值为 86.5 亿元,满足保守情景和激进情景的投资估值分别为 82.7 亿元和 90.7 亿元,而国网冀北公司年均配网投资数额为 30 亿元左右,可见投资规模相对较大。常规情景下 2030 年农村充电需求的具体投资组成见表 9。

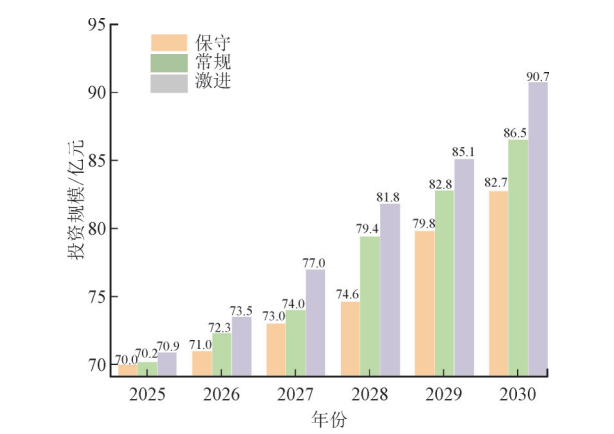


图 3 冀北 2025—2030 年农村充电设施投资预测结果
 Fig.3 Forecast results of investment in rural charging and power distribution facilities in northern Hebei from 2025 to 2030

表 9 2030 年冀北全域投资估算结果
 Table 9 Estimated investment results for entire northern Hebei region in 2030

项目		数量/个	价格/万元
农村地区	含配电变压器村	5 224	650 951
	不含配电变压器村	12 189	92 730
乡镇地区	8 充电桩镇	640	90 316
	4 充电桩乡	246	31 045
合计			865 042

3.3 参数及影响因素敏感性分析

为满足未来一个阶段农村较大数量新能源汽车的充电需求,相关单位需对农村配电网及公共充电设施进行大规模投资。本文基于 Bass 模型参数敏感性分析,结合配桩率、充电同时率及配电变压器建设需求展开分析,并对配置方案进行跨区域适用性论证。

3.3.1 Bass 模型参数敏感性分析

本节对创新系数、模仿系数及市场最大潜量的敏感性进行分析,结果如图 4 所示。图 4(a)和 4(b)分别是创新系数和模仿系数在一个参数为常规情况下另一个参数分别为保守、常规和激进 3 种情景下的新能源汽车保有量预测结果,图 4(c)给出了当创新系数与模仿系统均处于常规情景时,新能源汽车保有量预测结果未随市场最大潜在量在变化响应。

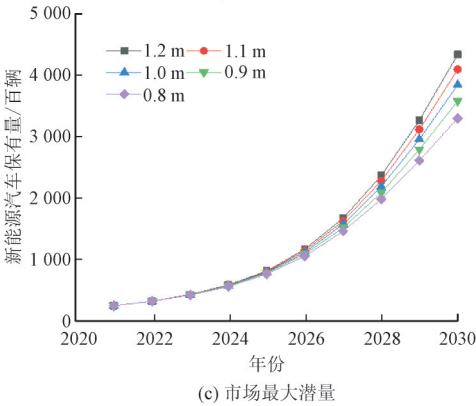
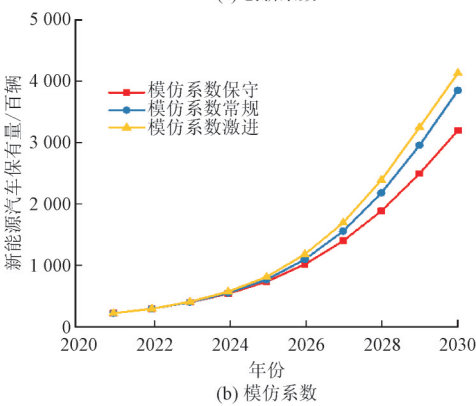
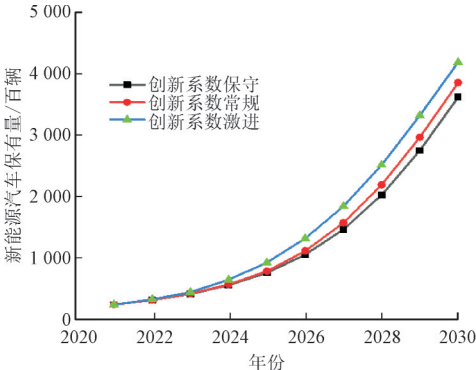


图 4 算例Bass扩散模型参数敏感性
 Fig.4 Sensitivity analysis of Bass diffusion model parameters in case study

结果显示在激进场景下,随着创新系数由 0.003 增长至 0.03,2030 年新能源汽车保有量可达到 41.78 万辆;在保守场景下,创新系数为 0~0.015,2030 年新能源汽车保有量为 36.09 万辆;模仿系数在激进场景下由 0.33 增至 0.6,对应的 2030 年新能源汽车保有量可达到 41.27 万辆,在保守场景下,模仿系数为 0.33~0.48,2030 年新能源汽车保有量为 31.97 万辆;到 2030 年,不同市场最大潜在量对应的预测结果分别为 32.99 万辆、35.81 万辆、38.47 万辆、40.99 万辆和 43.39 万辆。

3.3.2 配桩率

农村新能源汽车配桩率对投资规模的制约作

用主要体现在用户报装接电、新建配电变压器容量及乡镇公共充电桩建设数量等维度。配桩率对投资规模影响的变化趋势见图5。根据测算,冀北农村家庭充电桩的配桩率较乡镇集中充电站配桩率对投资影响的灵敏性更大,同时当乡镇配桩率降至1:50时,对投资规模的影响就不再显著。

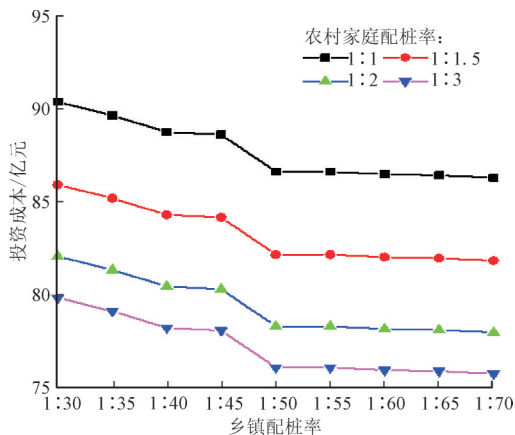


图5 配桩率-成本变化趋势

Fig.5 Charging pile allocation rate vs. cost variation trend

3.3.3 充电同时率

充电同时率对农村配电网投资规模的影响作用体现在配电变压器容量配置传导机制上。充电同时率对投资规模影响的变化趋势如图6所示。根据测算,家庭充电同时率及乡镇同时率对投资规模的影响敏感性均较大,当乡镇充电站的充电同时率降低到0.5时该因素对投资规模的影响敏感性较小,家庭充电同时率为0.6和0.8时对投资规模没有影响,这是因为在2个同时率下选用同一容量变压器,因此不会对投资规模产生影响。

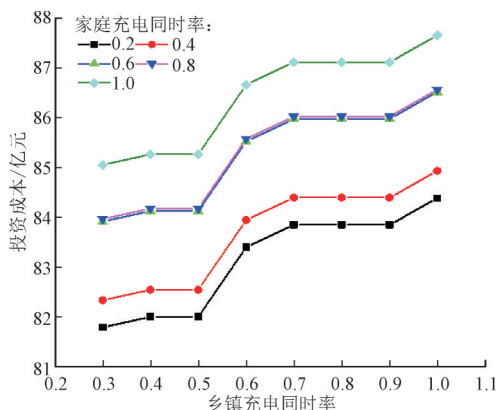


图6 充电同时率-成本变化趋势

Fig.6 Charging simultaneity rate vs. cost change trend

3.3.4 配电变压器建设

配电变压器及其配套的10 kV线路建设投资是

整体工程中投资占比最大的,其对投资成本的影响敏感度最高。配电变压器建设对投资规模影响的变化趋势如图7所示。根据测算,当冀北农村地区所有的新建配电变压器平均接线距离减少0.5 km时,相应的配电网投资将减少约4.2亿元,减少投资4.8%;新建农村配电变压器比例降低3%时,配网投资将减少约6.11亿元,降低投资约7.1%。

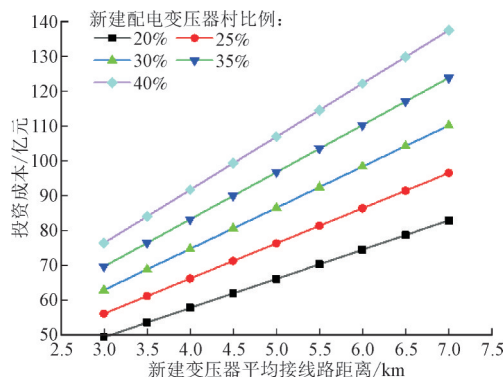


图7 配电变压器建设-成本变化趋势

Fig.7 Distribution transformer construction vs. cost variation trend

3.3.5 配置结果与各地区间的匹配关系

本文算例的配置结果聚焦于冀北地区,冀北地区属华北地区中经济较为发达的区域,是首都经济圈的主要组成部分,其农村城镇化、现代化建设较为领先,对新能源汽车的接受程度较高^[26],此外冀北农村地区电网电力供应同全国大多数地区相同,属于紧平衡状态,农村配电网可开放容量情况并不充裕^[27]。对应具体不同地区,本文在表10中定性给出了各地区与本文配置结果在农村基本情况及电网情况之间的匹配关系。

表10 各地区农村基本情况与电网情况对应匹配关系

Table 10 Corresponding matching relationships between rural basic conditions and grid status across regions

地区	农村基本情况	农村电网情况
东北(非高寒)	新能源汽车渗透率略小	较紧张
西北(非高寒)	新能源汽车渗透率略小	容量较紧张
华东	新能源汽车渗透率略大	容量充裕
华中	新能源汽车渗透率略大	容量较充裕
华南	新能源汽车渗透率大	容量较充裕
西南	新能源汽车渗透率大	容量较紧张

就东北地区而言,考虑其总体气候寒冷的原因,新能源汽车渗透率较冀北地区更小,其农村电网可开放容量较冀北地区更为紧张。综合考虑东

北地区农村新增充电负荷较少但农村电网容量更为紧张,因此东北地区对于农村充电配套设施投资相较冀北地区略高;就西南地区而言,其气候条件更加适宜使用电动汽车,因此其农村新能源汽车渗透率相较冀北地区会更高,然而其农村电网可开放容量却更为紧张,因此其农村充电配套设施的投资相较冀北地区更大;就华东地区而言,其农村新能源车渗透率较大,但是其农村电网可开放容量大,因此其对于农村充电配套设施的投资相对更小。

4 结论与建议

为明确农村配套充电基础设施建设需求,合理规划投资建设路径,本文提出了改进 Bass 扩散模型,对未来 5 年农村新能源汽车保有量变化进行预测,并基于指标概算定额法和单元指标估算法度及未来投资需求进行测算。基于冀北地区的案例研究得到以下结论:

1)到 2030 年,在 3 个情景下,冀北农村新能源汽车保有量分别达到 29.37 万辆、38.47 万辆和 44.3 万辆,分别为当前保有量的 7.3 倍、9.6 倍和 11.1 倍。农村新能源汽车保有量增速较快。

2)2030 年,3 个场景下冀北农村充、配电设施投资建设需求的规模分别高达 82.7 亿元、86.5 亿元和 90.7 亿元,相当于冀北当前配网投资水平续增 55%~58%。电网企业对应的投资压力极大。

3)配电变压器建设对总投资规模的影响最显著,配电变压器平均接线距离减少 0.3~0.7 km 时,相应的配电网投资可减少约 2.5~5.8 亿元;配电变压器比例降低 3%~5% 时,配网投资将减少约 6.1~10.2 亿元。在投资建设中要着重考虑配电变压器的规划。

同时,本文基于研究结果给出以下政策建议:(1)推行“两户一桩”的农村家庭充电桩共享模式并在乡镇地区按照 50:1 配置充电桩,能够降低农村充电设施配桩率;(2)推行充电站分时服务费策略及居民充电设施电费施行分时电价机制,引导居民有序充电,降低充电同时率;(3)推行负荷协同策略以及分布式能源、储能和充电桩协同运行模式,合理降低新建配电变压器数量;(4)优化公共充电站、农村新建配电变压器选址,降低平均建设线路长度。

参考文献

[1] 李金鹏,冯华,陈晓刚,等.计及多重不确定性的规模化电动汽

车接入配电网调度方法[J].电力系统自动化,2024,48(7):138-146.

LI Jinpeng, FENG Hua, CHEN Xiaogang, et al. Dispatching method for large-scale electric vehicles connecting to distribution network considering multiple uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 138-146.

[2] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(7):3-23.

HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.

[3] 王子龙,黄莉.基于改进图时间卷积网络的农村地区电动汽车充电负荷预测及其对农网的影响[J].电力需求侧管理,2024,26(5):88-93.

WANG Zilong, HUANG Li. Electric vehicle charging load prediction in rural areas and its impact on rural power grids based on modified graph temporal convolutional network[J]. Power Demand Side Management, 2024, 26(5): 88-93.

[4] 肖白,郭蓓,季帅,等.考虑区域配电网风险承受能力差异的网架规划方法[J].电力自动化设备,2020,40(3):68-75.

XIAO Bai, GUO Bei, JI Shuai, et al. Grid planning method considering difference in risk bearing capacity among regional distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 68-75.

[5] 易姝娴,王晶,梁伟宸,等.面向农村配电网电压优化控制的自适应动态分区方法[J].电力系统及其自动化学报,2025,37(3):110-119.

YI Shuxian, WANG Jing, LIANG Weichen, et al. Adaptive dynamic partitioning method for voltage optimization control in rural distribution networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2025, 37(3): 110-119.

[6] 唐巍,王照琪,张璐.绿色低碳能源转型背景下的新型乡村能源体系形态特征与关键技术[J].供用电,2024,41(8):88-99.

TANG Wei, WANG Zhaoqi, ZHANG Lu. Morphological characteristics and key technologies of new-type rural energy system under low-carbon energy transformation[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(8): 88-99.

[7] 于梦桐,高辉,杨凤坤.计及电动汽车保有量增长需求的充电负荷预测[J].现代电子技术,2024,47(6):55-62.

YU Mengtong, GAO Hui, YANG Fengkun. Charging load forecasting considering growth demand for electric vehicle ownership[J]. Modern Electronics Technique, 2024, 47(6): 55-62.

[8] 于霄宇,纪正森,嵇灵,等.双碳目标下我国电动汽车碳减排贡献潜力分析[J].智慧电力,2024,52(2):25-31,39.

YU Xiaoyu, JI Zhengsen, JI Ling, et al. Analysis on carbon emission reduction potential of electric vehicles in China under goal of carbon neutrality and carbon peaking[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 25-31, 39.

[9] 李强,王凯凯,刘红丽,等.基于 LSTM-SD 组合模型的城市电动汽车保有量中长期预测[J].电力信息与通信技术,2023,21(7):88-95.

LI Qiang, WANG Kaikai, LIU Hongli, et al. Medium and long term

- prediction of urban electric vehicle ownership based on LSTM-SD combined model[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(7): 88-95.
- [10] 刘斌, 赵天舒, 张冉霞. 基于改进PCA-Logistic模型对个人汽车保有量预测[J]. 公路交通科技, 2020, 37(8): 136-143.
LIU Bin, ZHAO Tianshu, ZHANG Ranxia. Prediction of private car ownership based on improved PCA-Logistic model[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(8): 136-143.
- [11] 黄汉远, 顾丹珍, 郑德博. 远期大规模的电动汽车与分布式光伏接入配电网的负荷预测模型[J]. 可再生能源, 2021, 39(5): 650-657.
HUANG Hanyuan, GU Danzhen, ZHENG Debo. The load forecasting model of long-term large-scale electric vehicle and distributed photovoltaic access distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(5): 650-657.
- [12] 郭焱, 崔滨, 张晓君. 基于Gompertz和Logistic组合模型的汽车保有量中长期预测[J]. 公路交通科技, 2023, 40(10): 201-207.
GUO Yan, CUI Bin, ZHANG Xiaojun. Medium and long term prediction on vehicle ownership based on combined model of gompertz and logistic[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(10): 201-207.
- [13] XIAN Y, XIA M, SU S, et al. Research on the market diffusion of fuel cell vehicles in china based on the generalized bass model[J/OL]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(2): 2950-2960.
- [14] 段晓晨, 鲍默, 牛衍亮, 等. 海外铁路建设项目造价人工智能估算方法研究[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(9): 112-118.
DUAN Xiaochen, BAO Mo, NIU Yanliang, et al. Cost estimation method for overseas railway construction project based on artificial intelligence[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(9): 112-118.
- [15] 陈菲菲. 基于多源数据融合的抽水蓄能项目投资估算方法[J]. 水利技术监督, 2024, (4): 115-118.
CHEN Feifei. Investment estimation method for pumped storage projects based on multi-source data fusion[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2024, (4): 115-118.
- [16] 冯领香, 李可心, 杨铭, 等. 案例推理在通风空调工程投资估算中的应用研究[J]. 建筑经济, 2023, 44(S1): 77-81.
FENG Lingxiang, LI Kexin, YANG Ming, et al. Research on the application of case-based reasoning in the investment estimation of ventilation and air conditioning engineering[J]. Construction Economy, 2023, 44(S1): 77-81.
- [17] 宋金华, 岳浩. 基于PCA-PSO-LSSVM的综合管廊投资估算方法[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(1): 36-44.
SONG Jinhua, YUE Hao. On investment estimation method of comprehensive pipe gallery based on PCA-PSO-LSSVM[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(1): 36-44.
- [18] 郝武民, 路梦雪, 刘博杰, 等. 核化工项目建议书和可行性研究投资估算方法研究[J]. 价值工程, 2024, 43(8): 1-4.
HAO Wumin, LU Mengxue, LIU Bojie, et al. Research on the methods of cost estimation for nuclear chemical projects in the project proposal and feasibility study[J]. Value Engineering, 2024, 43(8): 1-4.
- [19] 尹美群, 王朝, 何顶. “双碳”背景下分布式光伏项目投资效益研究——以北京市A公司为例[J]. 中国管理会计, 2022, (2): 73-80.
YIN Meiqun, WANG Chao, HE Ding. Analysis of investment return on distributed solar energy project[J]. China Management Accounting Review, 2022, (2): 73-80.
- [20] 王萌. 电动汽车充换电站网络布局与运营研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [21] 杨利华. 非农就业对我国农村家庭耐用品消费的影响研究[D]. 成都: 西南财经大学, 2021.
- [22] 赵安军, 王鹏柱, 荆竞, 等. 考虑电动汽车影响的农村家庭新能源容量优化配置方法[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 31-39, 50.
ZHAO Anjun, WANG Pengzhu, JIN Jing, et al. Optimal configuration method of new energy capacity for rural households considering impact of electric vehicles[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 31-39, 50.
- [23] 张雪, 周密. 农户种植结构调整中的羊群效应——以辽宁省玉米种植户为例[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2019, (4): 54-62, 171, 172.
ZHANG Xue, ZHOU Mi. Herding effect in adjustment of farmers' planting structure——A case study of maize farmers in liaoning provinces[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2019, (4): 54-62, 171, 172.
- [24] 四川省发展和改革委员会, 四川省能源局. 四川省加快推进充电基础设施建设支持新能源汽车下乡和乡村振兴工作方案: 川发改办〔2023〕542号[EB/OL]. (2023-11-09)[2024-5-7]. <https://fgw.sc.gov.cn/sfgw/qtwj/2023/11/9/7f8eff0e25d74262a682d15112cca49d.shtml>.
- [25] 河北省人民政府办公厅, 河北省统计局. 河北农村统计年鉴(2023)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023: 127-267.
- [26] 周原冰, 龚乃玮, 王皓界, 等. 中国电动汽车发展及车网互动对新型储能配置的影响[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 1-11.
ZHOU Yuanbing, GONG Naiwei, WANG Haojie, et al. Study on the influence of electric vehicle development and the vehicle-grid interaction on new energy storage configuration in China[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 1-11.
- [27] 陈维江, 靳晓凌, 吴鸣, 等. 双碳目标下我国配电网形态快速演进的思考[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6811-6818.
CHEN Weijiang, JIN Xiaoling, WU Ming, et al. Thinking on the rapid evolution of distribution network form under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6811-6818.

(责任编辑 申光艳)

收稿日期: 2024-11-22; 修改日期: 2025-05-07

作者简介: 秦世伟(1998), 男, 内蒙古呼和浩特人, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统运行分析、柔性负荷、农村能源系统。E-mail: 306700262@qq.com