基于蒙特卡洛法的城市电动汽车充电负荷预测

任明远[1]，姜明军[1]，宋玉峰[2]，彭　晶[1]，陈思行[1]，李帅兵[2]

（1. 国网甘肃省电力公司，甘肃 兰州 730031；2. 兰州交通大学新能源与动力工程学院，甘肃 兰州 730070）

摘要：近年来，我国电动汽车数量呈现出高增长趋势，针对电动汽车充电负荷的不确定性对电网的影响，提出一种基于改进 Bass 模型预测电动汽车保有量的方法，在此基础上，构建出蒙特卡洛法的城市电动汽车充电负荷预测模型。首先，通过改进非线性最小二乘法，对模型参数进行估计和初步优化，提出了一种组合预测模型分析传统汽车数量，并通过基于层次分析法的德尔菲法，建立传统汽车和电动汽车之间的联系，以此进行电动汽车保有量的预测；其次，基于蒙特卡罗法模拟城市电动汽车用户出行习惯，预测电动汽车的无序充电行为，形成电动汽车的日负荷曲线；最后，基于某地实际数据建立仿真模型，验证该模型的可行性。

关键词：电动汽车；充电负荷预测；蒙特卡洛法；保有量；Bass 模型

Research on charging load forecasting of urban electric vehicle based on Monte Carlo method

REN Mingyuan[1], JIANG Mingjun[1], SONG Yufeng[2], PENG Jing[1], CHEN Sixing[1], LI Shuaibing[2]

(1. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730031, China; 2. School of New Energy and Power Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In recent years, the number of electric vehicles in China has shown a high growth trend. In view of the impact of the uncertainty of electric vehicle charging load on the power grid, a method based on the improved Bass model to predict electric vehicles ownership is proposed. On this basis, a Monte Carlo method for urban electric vehicle charging load prediction model is constructed. Firstly, by improving the nonlinear least squares method, the model parameters are estimated and preliminarily optimized, and a combined forecasting model is proposed to analyze the number of traditional cars. Through the Delphi method based on the analytic hierarchy process, the relationship between traditional cars and electric vehicles is established to predict the electric vehicles ownership. Secondly, based on Monte Carlo method, the travel habit of urban electric vehicle users is simulated to predict the disorderly charging behavior of electric vehicles and form the daily load curve of electric vehicles. Finally, a simulation model is established based on the actual data of a certain place to verify the feasibility of the model.

Key words: electric vehicles; charging load forecasting; Monte Carlo method; ownership; Bass model

0　引言

汽车产业是我国重要的支柱型产业之一，在促进经济增长、推动社会发展中发挥着重要作用。伴随资源短缺问题日益严峻，传统燃油汽

车难以达到节能减排的目标，全球各国均加强了对电动汽车相关产业的投入。同时，电动汽车产业的日益成熟及相关利好政策的出台也使得其价格成本逐渐降低，电动汽车因此受到了越来越多消费者的青睐。2020年11月，国务院办公厅发布了《新能源汽车产业发展规划（2021—2035）》，提出到2025年，我国新能源汽车新车销售量达到汽车新车销售总量的20%左右。同时根据公安部发布的统计数据，2016—2021年，我国电动汽车保有量从73万辆跃升至640万辆，2021年纯电动汽车市场渗透率更是达到了81.63%，显示出极强的市场活力与广阔的市场前景。

与此同时，电动汽车作为一种新型电力负荷，其波动性及不确定性较强，若大规模地接入配电网，尤其是稳定性相对较弱的小型和中型电网，将不可避免地会对其运行产生影响，轻者加重网络损耗，造成资源浪费，重者威胁电网运行安全，引发事故[1]。因此，为了有效应对电动汽车充电负荷大规模接入配电网所造成的不利影响，必须进行较为准确的电动汽车保有量及其所产生的充电负荷的预测。

在预测电动汽车保有量方面，采用较为广泛的是基于Bass模型的电动汽车保有量预测[2]。文献[3]采用普通Bass模型进行参数化，但未考虑其他相关因素对模型参数的影响，在目前油价波动的大环境下适用性较低；文献[4]在此基础上进行了改进，提出了参数受油价因素影响的广义Bass模型；此外，中长期保有量预测较为常见的方法还有无饱和度限制方法，如文献[5]采用弹性系数法与千人保有量法对陕西省电动汽车保有量进行对比预测分析，结果表明，考虑人均GDP的千人保有量法预测较为准确，同时呈现出电动汽车未来五年的发展趋势。综合来看，目前的保有量预测模型虽然种类较多，但考虑的因素都过于单一。因此，本文提出一种组合预测模型，结合各方案优势进行预测。

在电动汽车充电负荷预测方面，早期文献[6]大多进行的是电动汽车动力电池模型的研究分析，但电动汽车动力电池种类众多，全球各车辆生产企业并未形成统一的电动汽车动力电池生产标准，因此预测难度较大。近年来，伴随电动汽车的迅猛发展，电动汽车出行数据的日益丰富，使得对充电负荷时空分布的预测成为了可能。文献[7]基于蒙特卡洛模拟法，拟合了用户出行习惯的粗略相关概率分布，但未考虑电动汽车的比例参数，因此限制了该模型的适用性，文中将对此进行改进。

本文在电动汽车保有量预测部分采用改进的Bass模型，通过组合预测模型对传统的汽车保有量进行预测，并采用基于层次分析法的德尔菲法分析电动汽车市场的最大潜力，修改优化创新系数和模仿系数。在负荷预测部分，使用蒙特卡洛算法建立电动汽车用户出行习惯的概率分布函数，预测电动汽车大规模接入电网后的负荷变化。

1 电动汽车保有量预测模型

基于改进Bass模型的电动汽车保有量预测需要建立传统汽车与电动汽车之间的联系，优化Bass模型的最大潜力、发展系数和创新系数。

1.1 Bass模型

Bass模型是用于预测耐用消费品销售额的模型[8]。在普通Bass模型的基础上，考虑电动汽车随时间变化的潜力，并优化参数，公式为

$$N(t)=m(t)\left[\frac{1-\mathrm{e}^{-(p+q)t}}{1+\frac{q}{p}\mathrm{e}^{-(p+q)t}}\right] \tag{1}$$

式中，$N(t)$为电动汽车的累计保有量；p为创新系数，指尚未使用产品的消费者，受到互联网和广告等外部因素的影响后使用产品的可能性；q为发展系数，即消费者根据已使用该产品的消费者的传播而选择产品的可能性[9]；$m(t)$为随时间变化的最大潜力。

1.2 组合预测模型

1.2.1 灰色预测模型

灰色预测是一种预测具有不确定性因素系统

的预测方法[10]。它通过寻找已知较少的数据规律，生成具有较强规律性的数据序列，然后建立相应的微分方程模型预测未来的发展趋势，即

$$\hat{y}^{(1)}(t)=\left[y^{(0)}(1)-\frac{\hat{b}}{\hat{a}}\right]\mathrm{e}^{-\hat{a}(t-1)}+\frac{\hat{b}}{\hat{a}} \tag{2}$$

式中，$\hat{y}^{(1)}$为重现值；$y^{(0)}(1)$为初始值；t为时间变量；$\hat{b}/\hat{a}$为灰色模型中白色加热方程的拟合斜率。

1.2.2 BP 神经网络

BP神经网络的原理是根据给定训练样本的输入向量和输出向量进行连续学习[11]，调整神经元之间的权重和阈值，使网络连续逼近样本输入和输出之间的映射关系，然后通过测试样本预测结果的准确性。

1.2.3 组合预测方法

各种单一预测方法都有一定的不稳定性，因此提出一种组合预测方法，通过组合权重，使所获得的预测数据的总误差最小。该方法克服了单一预测模型的缺点，充分利用了各预测模型的优点，有效地提高了预测准确度。公式为

$$Q=\min\left(\sum_{i=1}^{3}\omega_i(t)\left[y_i(t)-\hat{y}_i(t)\right]^2\right) \tag{3}$$

式中，Q为最小误差二次方和；$\omega_i(t)$为各模型的比例。

1.3 Bass参数拟合与优化

目前，我国电动汽车的普及率仍然不高，基于历史数据的参数估计方法误差较大。本文提出一种改进的参数估计方法，将传统的参数估计与基于层次分析法的德尔菲法相结合，以提高Bass模型中参数估计的准确度。层次分析法是一种定性和定量相结合的决策分析方法；德尔菲法是一种反馈和匿名查询的方法，它通过多次查询降低了专家的主观性影响。因此，可以结合这两种方法校正参数估计。

$$W=\frac{\lambda_{\mathrm{EV}}}{\lambda_{\mathrm{TA}}} \tag{4}$$

式中，W为参数优化比例；λ_{EV}、λ_{TA}为电动汽车与传统汽车的综合得分。

2 基于蒙特卡洛法的电动汽车负荷预测模型

2.1 电动汽车充电负荷特性分析

根据交通统计数据，结合甘肃省某市的发展现状，本文选取了该市三种电动汽车类型进行研究，即公交车、出租车和私家车。公交车的动力电池容量相对较大，而出租车和私家车的动力电池容量相对较小。在充电类型及收费方面，出租车对于充电时间往往具有紧迫性要求，故选择了快速充电及对应的收费类型。私家车在住宅区和工作场所有足够充裕的充电时间，因此选择慢充电方式。公交车由于行驶路线及行驶时间固定，对充电的急迫性并不强烈，因此也选择了慢充电方式。

2.2 车辆行驶时空模型分析

2.2.1 出行起始时刻

电动汽车的出行起始时刻受诸多因素的影响，包括电动汽车的类型、用户的个人出行习惯、汽车电池容量、出行季节及节假日等。统计结果如图1所示。

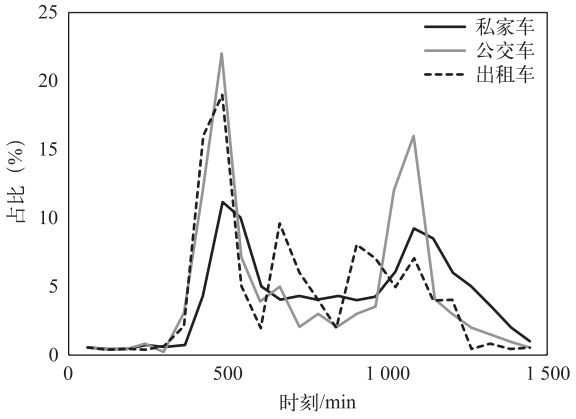

图 1 出行起始时刻统计

Fig. 1 Travel start time statistics

2.2.2 日行驶里程

私人汽车的里程受多种因素影响，其中工作日和节假日受影响最大。私家车日出行里程如图2所示。

出租车的日行驶里程较为复杂，受出租车司机频率选择和城市需求等因素的影响，平均每日

里程在220～620 km之间。根据实际运营数据，发现出租车的日出行里程具有相对中间值，其他数据在中间值附近波动。本文将其分为两类，即N（255，215）和N（345，215）。

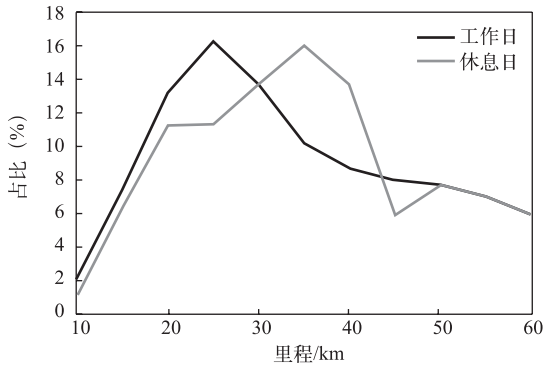

图 2 私家车日出行里程

Fig. 2 Daily mileage of private cars

公交车的日行驶里程相对统一，主要取决于公共车辆固定线路的长度、公交车密度、道路阻力程度和运营时间等因素。根据调查数据分析，公共车辆平均里程在150～200 km之间，反映了随机分布的特点。因此，本文假设公共汽车的日行驶里程服从均匀分布[150，200）。

2.3 电动汽车充电负荷建模

本文假设行驶过程中每公里耗电量相同，充电过程为恒功率充电。每分钟计算一次负荷数值，共1 440个负荷计算节点，建模步骤如下。

（1）随机选择基本计算参数

根据上述数据分析的相关参数，确定仿真次数、仿真电动汽车数量和电动汽车类型对应的最大里程，并初始化仿真程序参数。

（2）计算电动汽车荷电初始状态

$$\mathrm{SOC}_1=\left(\mathrm{SOC}_0-\frac{d}{d_\mathrm{m}}\right)\times 100\% \tag{5}$$

式中，SOC_1为电池开始充电时的荷电状态；SOC_0为电池最后一次充电完成时的荷电状态；d为此次行驶的里程；d_m为车辆的最大里程。

（3）计算充电所需的时间

$$T=\frac{E}{\eta_i p_i} \tag{6}$$

式中，p_i为第i辆电动汽车充电功率；η_i为第i辆电动的充电效率；E为电动汽车电池容量；T为电动汽车充电时间。

（4）计算各节点负荷功率

$$P_{i,k}=\sum_k^N P_{i,t_{k-1},k} \tag{7}$$

式中，$P_{i,k}$为第i辆电动汽车在k节点的充电功率；$P_{i,t_{k-1},k}$为第i辆电动汽车在前一时刻节点的充电功率。

3 算例仿真

3.1 传统汽车保有量预测

以某市2010—2020年相关统计数据为例，进行传统燃油汽车保有量预测。

1）灰色预测模型预测结果准确性的关键在于数据序列的平滑度。平滑度越好，预测准确度越高。

2）用最小二乘法对传统机动车保有量进行线性拟合，拟合的线性曲线参数为10.23和－0.000 207。

3）通过BP神经网络训练数据。训练采用Levenberg-Marquardt方法，选择训练的神经元为20个，其中60%的原始数据作为训练组，20%的原始数据作为验证组，20%的原始数据作为测试组。培训效果理想。当训练次数达到40次时，训练效果最好，训练组的拟合优度为99.5%。

通过以上三种模型及其训练参数，预测了至2030年的传统汽车的保有量。结果如图3所示。

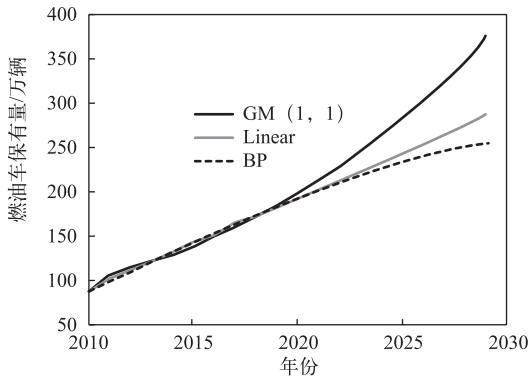

图 3 组合预测模型预测结果

Fig. 3 Forecast results of combined forecast model

3.1.1 组合预测

模型往往不能反映产品的变化和发展。因此，将灰色预测模型GM(1，1)、线性回归模型（Linear）和BP神经网络模型相结合，采用非线性规划方法，以误差二次方和（SSE）为目标函数，优化最小SSE，输出结果见下表。

表　组合预测权重和 SSE

Tab. Combination forecast weight and SSE

模型	权重	SSE
GM(1，1)	0.444 6	34.44
Linear	0.180 6	26.27
BP	0.375 8	42.24
CF	—	17.25

3.1.2 Bass 模型拟合与参数优化

由普通最小二乘法公式计算，创新系数为0.016，发展系数为0.443。首先以普通最小二乘法的估计结果作为初始值，再通过非线性最小二乘法进行参数优化得出结果，计算出创新系数为0.014，发展系数为0.446。通过基于层次分析法的德尔菲法，最终计算得出创新系数为0.012，发展系数是0.312。

3.1.3 电动汽车保有量预测结果输出

电动汽车保有量预测结果输出如图4所示。

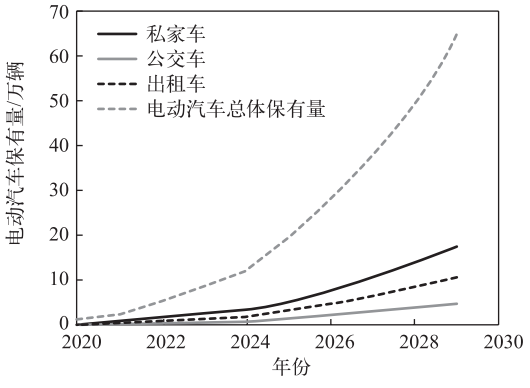

图 4　电动汽车保有量预测

Fig. 4 Prediction of electric vehicle ownership

根据国家发展研究院发布的《交通发展分析报告》得出：私家车、出租车和公交车总数占车辆总数的99.49%，其中私家车占81.56%，出租车占16.71%，公交车占1.22%。不难看出，一个城市的车型比例在短期内不会发生显著变化。

3.2　电动汽车负荷预测

电动汽车负荷预测结果如图5所示。私家车峰值充电负荷主要集中在城市居民下班回家后，导致19:00—22:00之间的负荷压力较大。出租车和公交车的充电时间相对分散，但也有小高峰。由此可见，私家车的负荷对电网影响最大，因此应鼓励用户进行调峰，参与需求响应，以缓解电网运行压力，提高电网利用率。

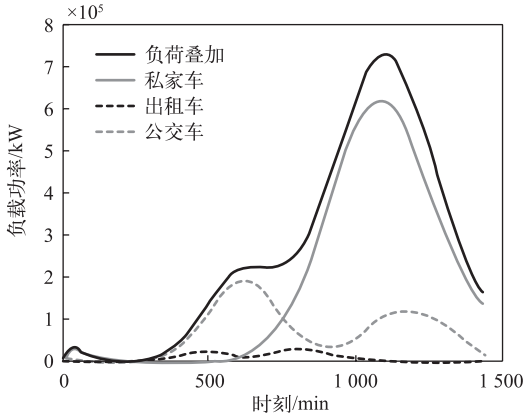

图 5　电动汽车负荷预测结果

Fig. 5 Electric Vehicle Load Forecast Resultss

4　结束语

我国电动汽车数量呈现出高增长趋势，针对电动汽车充电负荷的不确定性对电网的影响，本文做了以下工作。

1）构建了电动汽车保有量预测模型，针对普通Bass模型的缺陷和参数估计不准确的缺点，提出了一种改进的Bass模型。

2）构建了电动汽车的负荷预测模型，针对电动汽车规模未知导致出行习惯概率分布不准确和预测准确度低的问题，提出基于蒙特卡洛法模拟城市电动汽车用户出行习惯，通过某地数据进行仿真分析，得到电动汽车负荷预测结果。

该模型提高了预测的严谨性，对未来电动汽车参与需求响应等工作提供了借鉴。

参考文献

[1]　李晓辉，李磊，刘伟东，等．基于动态交通信息的电动汽车充电负荷时空分布预测[J]．电力系统

保护与控制，2020，48(1)：117-125.
[2] 赵丹．碳减排约束下京津冀区域电动汽车保有量及预测研究[D]．北京：华北电力大学，2020．
[3] 郭月新．考虑环境温度下电动汽车中长期负荷预测及充电负荷优化研究[D]．南昌：南昌大学，2021．
[4] 华远鹏，王圆圆，韩丁，等．考虑有序充电的居民区电动汽车中长期充电负荷预测[J]．电力系统及其自动化学报，2022，34(6)：142-150．
[5] 王中阳，王威，戴建卓，等．基于弹性系数法和千人保有量法的陕西省电动汽车保有量的预测[J]．电网与清洁能源，2016，32(5)：142-147．
[6] 徐虹，贺鹏，艾欣．电动汽车充电功率需求分析模型研究综述[J]．现代电力，2012，29(3)：51-56．
[7] 陈鹏，孟庆海，赵彦锦．基于蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷计算[J]．电气工程学报，2016，11(11)：40-46．
[8] 于光辉，宁钟，李昊夫．基于专利和Bass模型的颠覆性技术识别方法研究[J]．科学学研究，2021，39(8)：1467-1473，1536．
[9] 马源培，杨卓璇，李慧嘉．结合Bass模型和LTV的创新产品扩散预测[J]．聊城大学学报(自然科学版)，2020，33(4)：26-32．
[10] 王安，张智博，杨雨，等．基于神经网络的灰色预测模型及其在中国粮食总产量预测中的应用[J]．数学的实践与认识，2021，51(18)：102-107．
[11] 李萍．基于BP和多项式拟合模型在电力系统短期负荷的研究[J]．工业仪表与自动化装置，2018(5)：135-138．

作者简介

任明远 （1983—），男，硕士，高级工程师，从事综合能源系统方面的研究。

姜明军（1981—），男，硕士，高级工程师，从事配电与用电系统及控制、电力营销、综合能源服务、需求响应研究。

彭晶（1987—），男，硕士，高级工程师，从事电力营销、电力节能研究。

李帅兵（1989—），男，博士，讲师，从事综合能源系统方面研究。

宋玉峰（1998—），男，硕士，从事综合能源系统方面研究。

（收稿日期：2022-10-11）