

Electric Vehicle Load Forecasting Based on BP Neural Network

Xin Lan

The Affiliated Middle School of Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan
Email: 630448794@qq.com

Received: Jan. 3rd, 2019; accepted: Jan. 18th, 2019; published: Jan. 25th, 2019

Abstract

Large-scale electric vehicles (EVs) access will cause serious impact on the power grid and affect the reliable operation. In order to reduce the damage to the balance of the power grid caused by the simultaneous access of EVs, the research on the electrical characteristics of EVs based on large data becomes the key to enhance the reliability and safety of the power grid. In this paper, through the characteristics and related parameters of EVs' operation, the impact of different factors on charging load is analyzed, and the charging load models of various types of EVs are studied. On this basis, combined with BP neural network algorithm, the development trend of EV is forecasted, the charging load forecasting model of EV is established, and the power consumption of EV in the next few years is estimated, which provides a reference basis for grid optimization and power distribution.

Keywords

Electric Vehicle, Big Data Analysis, Charging Load Models, BP Neural Network, Load Forecasting

基于BP神经网络的电动汽车负荷预测

兰馨

西南交通大学附属中学, 四川 成都
Email: 630448794@qq.com

收稿日期: 2019年1月3日; 录用日期: 2019年1月18日; 发布日期: 2019年1月25日

摘要

大规模电动汽车接入, 对电网造成严重冲击, 影响电网可靠运行。为减少电动汽车接入对电网的平衡造成的破坏, 研究基于大数据的电动汽车用电特性成为增强电网的可靠性与安全性的关键。本文通过电动汽车的利用特性及相关参数, 分析不同影响因素对充电负荷的影响, 研究各类电动汽车的充电负荷模型。

在此基础上结合BP神经网络算法对电动汽车的发展趋势进行预测，建立电动汽车充电负荷预测模型，预测未来几年电动汽车用电负荷趋势，为电网优化及电能分配提供参考依据。

关键词

电动汽车，大数据分析，充电负荷模型，BP神经网络，负荷预测

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.
 This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

近年来，随着电力电子行业的高速发展，蓄电池技术不断进步，电动汽车正在逐渐走入人们的视线中，许多国家都在大力推广电动汽车以解决能源与环境的问题[1]。电动汽车作为电力系统的负荷，具有随机性、间歇性、不确定性[2]。大规模电动汽车同时接入电网中会影响配电网的稳定性[3]。

目前，已有学者对电动汽车接入对电网的影响进行了分析及预测[4] [5] [6] [7]。有美国学者研究认为，大规模电动汽车的接入是造成电网波动的主要原因。在分析电动汽车对电网影响过程中，文献[4]将电动汽车蓄电池充放电特性引入模型，通过优化电池使用方法减少电动汽车对电网的影响。文献[5]利用电动汽车充电过程中电力系统的波动数据对大规模电动汽车的接入造成的电压不平衡进行了预测。随着电力大数据时代的到来，基于大数据的电动汽车用电特性的研究也逐渐增加[6] [7]。

本文通过大数据分析，利用电动汽车的利用特性、充电特性以及锂电池等相关参数，研究不同因素对充电负荷的影响。采用蒙特卡洛方法建立电动汽车日常充电的负荷模型。结合BP神经网络，预测电动汽车的短中长期的发展规模、发展趋势，结合电动汽车充电负荷预测，实现电动汽车的用电需求预测。

2. 充电负荷影响因素

电动汽车充电负荷是预测电动汽车未来几年汽车用电发展趋势的基础，若想确定电动汽车负荷就需要了解电动汽车的类型、用户使用习惯等。下文针对影响电动汽车充电的各类因素进行分析。

图1给出了影响电动汽车负荷的5种影响因素，即：电动汽车类型、能量供应模式、电动汽车保有量、蓄电池特性和电动汽车充电模式。

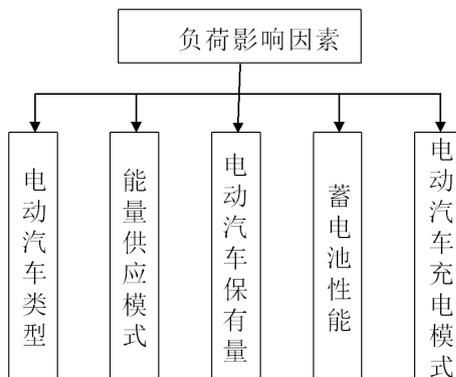


Figure 1. Influencing factors of EV charging load
 图1. 充电负荷影响因素

2.1. 电动汽车类型

不同类型的电动汽车，其使用频率、使用方式、能量消耗都不相同，这会造成各类电动汽车充电负荷也不一样。按照电动汽车的行驶特性将电动汽车分为：电动公交车、电动私家车和电动出租车。

电动公交车：线路一般都会由交通部门设定好，其发车时间、运营里程都是固定的。若电动公交车每日行驶的公里数、每公里的耗电量可知，即可确定电动公交车每天的充电次数。同时限定居民每日上下班时间，即可获得电动公交车的负荷分布。

电动私家车：其充电时间根据用户的使用习惯进行确定，有人喜欢在夜晚进行充电，有人会在上班期间对汽车补充电能，所以充电时间没有普遍规律性，当电池所剩电量不满足行驶需要时就及时进行充电，因此充电时间和地点都具有随机性。

电动出租车：电动出租车一般是采用多人轮班驾驶模式，电动出租车每天都有固定的停运时间，在其他时间都会不停歇运营。电动出租车面向的对象是广大乘客，这些乘客的目标地点都不一定，所以每辆汽车每天都具有不同行驶里程。因此，电动出租车只能在停止运营时补充电能。

2.2. 能量供应模式

电动汽车能量供给方式按照时间效率主要有3种供给方式：常规供给方式、快速供给方式和更换电池。

常规供给方式：每分钟供给电池的能量较小，充满电池所需时间较长，但供能较稳定，对电池的损害小，可以延长电池的使用寿命。该方式下，每分钟可以提供8 kJ左右的电能给电池，电池充满一般在7 h左右，相对其他方式充电时间较长。所以，出行比较规律、不需要紧急使用的车辆可以使用这种充电方式，在居住园区以及企业停车场的车辆的停放时间相对较长，一般都采用这种充电方式对电动汽车进行充电，例如电动私家车[7]。

快速供给方式：需要快速充电的电动汽车一般要采用快速供给方式，电池可以在短时间内得到电能的补充，快速满足电动汽车的运行要求。充电时间一般为5 min~2 h，其每分钟对电池供给的能量相对较大，供给电流大小约为160~410 A。该方式适用于停车时间比较短，或者出行不规律并且需要及时进行现场充电以满足行驶需求的电动汽车，如电动公交车和电动出租车[6]。

更换电池方式：在电动汽车电量不够完成行驶需求时更替为另一块充足电量的电池。通过跟换电池，电动汽车只需要几分钟就可以将电池充满电量，比其他充电方式以及传统的补充燃油的方式都要节省时间，但需要较多人工参与该过程。

2.3. 电动汽车保有量

电动汽车保有量，即电动汽车的运营数量。由于电动汽车的充电负荷与电动汽车基数呈线性关系，汽车的基数越大，其需要的用电量也就越高。我国电动汽车还处于推广和试运行阶段，电动私家车数量相对较少，电动公交车数量相对较多。

2.4. 蓄电池特性

蓄电池的特性也是影响电动汽车充电负荷的重要因素。电池的放电特性影响着电池的续航能力，主要体现为电动汽车每公里所消耗的电能；而充电特性是电池补充电量所展现的效果，这种效果包括充电时长和充电效率等。

1) 铅酸蓄电池

铅酸蓄电池的电极由铅及铅的氧化物所制成，并以硫酸溶液作为其电解液。该蓄电池在制作上拥有较成熟的技术，能够大量的生产；同时还具有开路电压相对较高，成本较为低廉，大电流放电性良好，

原材料丰富以及铅的回收率较高等优点。因此在电动汽车上得到广泛应用。但是，铅酸蓄电池对土地、河流会造成污染，能量利用的效率相对较低，这些不足又限制了铅酸电池的使用。

2) 锂电池

锂电池对于电动汽车来说是一种全新的电池，当前市面上批量生产的锂电池的正极材料一般为钴酸锂和锰酸锂等。由于锂离子会在正负极中进行嵌入和脱嵌，因此根据这个过程来实现充放电。相比其他电池，锂电池的循环充电次数更多，使用寿命更长。锂电池还具有体积小、安全性高等特点。在锂电池中，以磷酸铁锂为正极的锂电池安全更高，其平均循环次数可达 2000 次，它的放电性能相对稳定，价格也更便宜，是使用频率最高的锂电池。

由于锂电池的性能远优于铅酸蓄电池，所以本研究采用锂电池作为电动汽车电池的标准。

2.5. 电动汽车的充电模式

按照电网的运行要求以及电动汽车的充电标准，电动汽车在进行充电时可根据与电网的交互关系分为以下 3 种模式：

单项无序方式：汽车投入电网的同时就可以充电，但电动汽车不反馈电能。

单项有序方式：电动汽车在接入电网后，需要等到特定的时段才可以对能量进行补充，也不反馈电能。

双向有序方式：此方式与单项有序的不同之处在于，双向有序可以向电网反馈电能，实现电能的双向传输。

充电模式的不同会造成充电功率也不相同，所以也会使电动汽车充电负荷发生变化。本文以目前使用较多的单向无序充电方式作为研究背景。

3. 电动汽车充电负荷模型

本文采用数理统计以及概率论的方法对上述影响因素进行模拟，得到单位时间电动汽车的充电功率的概率分布，利用蒙特卡洛仿真实验的方法得到一定数量的电动车的充电功率的需求，按照不同的行车类型，建立电动汽车充电负荷预测模型。

3.1. 充电方式及充电时间

根据《2017 北京市电动汽车运营情况》可知，现运营的电动公交车额定日行驶里程约为 190 km，出租车每天行驶路程在 300 km 以上，一天内需要对电动公交车和电动出租车进行多次充电。

以北京市为例，公交车最早与最晚的运行时间分别为 5:35~6:05 和 22:05~23:05，而每天居民上下班的集中时段分别为 6:35~9:05 和 16:35~18:35。所以根据以上分析假设：电动公交车在白天采用快速充电，充电时间段为 10:05~16:35；电动公交车在夜晚采用常规充电，充电时段为 23:05~5:35。电动出租车按照大班/下班的运行模式，分别规定司机休息时间，确定供电时间。对于大班运营，司机拥有 3 个小时的休息间，从凌晨 2:05 至 5:05；小班的司机的休息时间一般为 11:35~14:05 和 2:05~4:05。由统计数据可知，电动私家车的充电时间具有随机性没有固定的充电时间范围，但根据用户的充电习惯可以得知，其充电起始时间呈正态分布。表 1 为电动汽车负荷变量参数。

3.2. 电动汽车日行驶距离及初始电量

电动车初始剩余电量 Q 能够反映电动汽车在充满电后所行驶的距离，即当电动汽车在充满电后行驶的路程越多，它下一阶段的起始剩余电量 Q 就越小。可以通过公式得到电动车在开始充电时的 Q ：

$$Q = \left(1 - \frac{L}{L_{\max}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中： L 为进行一次充电后汽车行驶的实际距离(km)； L_{\max} 为汽车充满电后所能行驶的最大距离(km)。

Table 1. EV load variable parameters
表 1. 电动汽车负荷变量参数

| 类型 | 次数 | 充电范围 | 概率 | 起始充电的电荷量分布 | 充电时刻分布 | 充电模式 |
|---------|----|-------------|-----|-------------|------------|------|
| 公交车 | 2 | 10:05~16:05 | 1 | N(0.5,0.01) | 均匀分布 | 常规 |
| | | 23:05~5:05 | | N(0.5,0.01) | | 快速 |
| 出租车(大) | 2 | 2:05~5:05 | 1 | N(0.3,0.01) | 均匀分布 | 快速 |
| | | 11:35~14:35 | | N(0.3,0.01) | | |
| 出租车(小) | 2 | 2:05~4:05 | 1 | N(0.3,0.01) | 均匀分布 | 快速 |
| | | 11:35~14:05 | | N(0.3,0.01) | | |
| 私家车(工作) | 1 | 7:35~17:05 | 0.2 | N(0.6,0.01) | N(9,0.25) | 常规 |
| | | 19:05~7:05 | 0.7 | N(0.6,0.01) | N(19,0.25) | |
| | | 19:05~22:05 | 0.1 | N(0.6,0.01) | 均匀分布 | |
| 私家车(周末) | 1 | 20:05~5:05 | 0.5 | N(0.6,0.01) | 均匀分布 | 常规 |
| | | 0:05~7:05 | 0.1 | N(0.6,0.01) | | |
| | | 12:05~22:05 | 0.4 | N(0.6,0.01) | | |

3.3. 电动汽车充电功率及时长

电动汽车的电池负荷特性决定了电动汽车的充电负荷功率大小。电池的负荷特性与其种类型号以及充电方式有关，在同种充电方式下，不同型号电池的充电负荷以及充电功率曲线也不相同。目前，锂电池作为中国电动汽车主要应用的动力电池，其充电功率可以认为是恒功率[5]。

若已知电动汽车每天的行驶里程，则可通过下式计算电动汽车充电时长：

$$t_s = \frac{LW}{P} \quad (2)$$

式中： t_s 为锂电池充满电所需要时间(h)； L 为电动车日行驶里程(km)； W 为电动车每公里所用电量(kWh/km)； P 为电动汽车充电功率(kW)。

表 2 与表 3 分别是不同类型充电方式下的功率参数以及不同类型电动汽车的锂电池参数。

Table 2. Charging power of EVs
表 2. 电动汽车充电功率

| 类型 | 常规充电(kW) | 快速充电(kW) |
|-----|----------|----------|
| 公交车 | 21 | 135 |
| 出租车 | 14 | 90 |
| 私家车 | 7 | 45 |

Table 3. Lithium battery parameters for EVs
表 3. 电动汽车的锂电池参数

| 类型 | 额定电压(V) | 额定容量(Ah) |
|-----|---------|----------|
| 公交车 | 320 | 600 |
| 出租车 | 320 | 200 |
| 私家车 | 320 | 100 |

3.4. 蒙特卡洛模拟法

蒙特卡洛模拟方法步骤：1) 构造电动车充电负荷的概率模型或随机模型；2) 在计算机中产生服从模型中各随机变量分布的随机数，产生足够的一次模型所需的随机变量；3) 设计并选择最匹配的抽样方法以满足概率模型的特点以及随机变量的相关特性，再对相关的随机变量抽样；4) 参照模型进行模拟试验、并计算，得到研究问题的随机解；5) 统计并对相关的模拟结果进行分析，得到相应的概率解。

3.5. 电动汽车充电负荷预测

电动汽车的充电负荷按照一天的充电功率进行计算。以 1 分钟为精度进行计算，1 天分为 1440 个充电段，第 i 个充电段的总充电功率即为该时刻所有车辆的充电功率之和，如下式：

$$P_i = \sum_{n=1}^N P_{n,i} \quad (3)$$

式中： P_i 为第 i 个充电段汽车的总充电负荷(kW)， $i = 1, 2, 3, \dots, 1440$ ； N 为电动汽车的总数； $P_{n,i}$ 为第 n 辆车在第 i 的充电段的充电功率(km)。

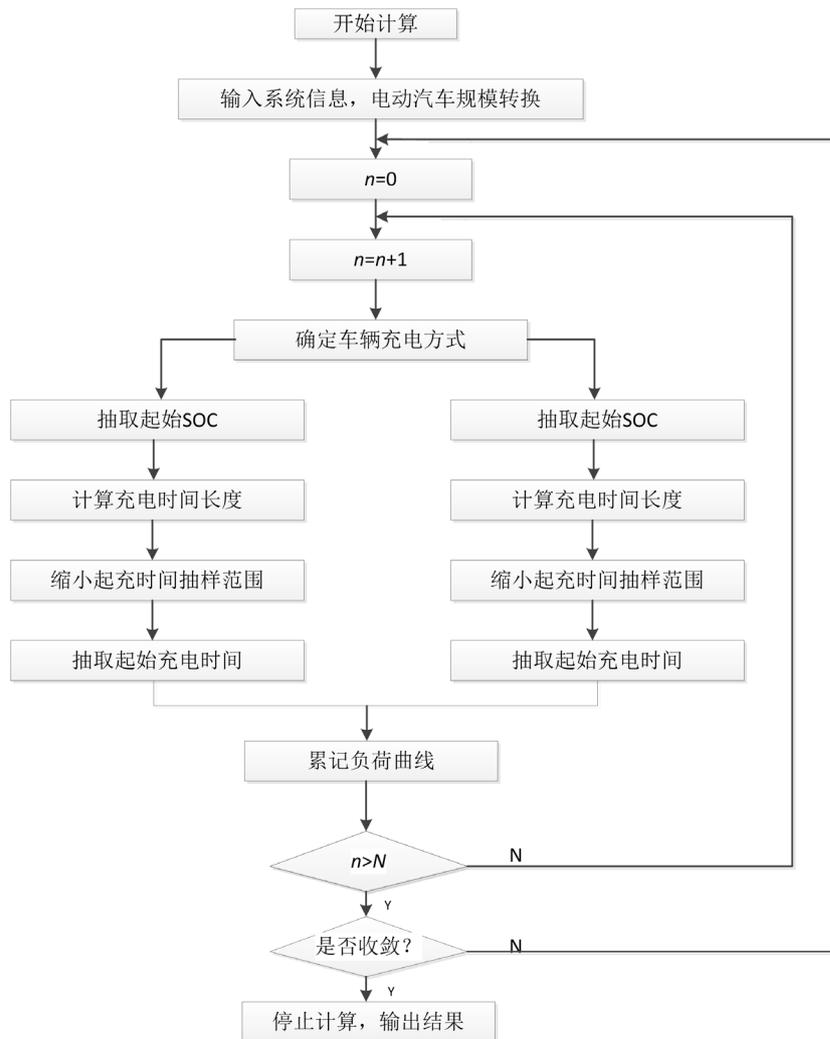


Figure 2. Charging load solution flow chart of electric bus
图 2. 电动汽车车充电负荷求解流程图

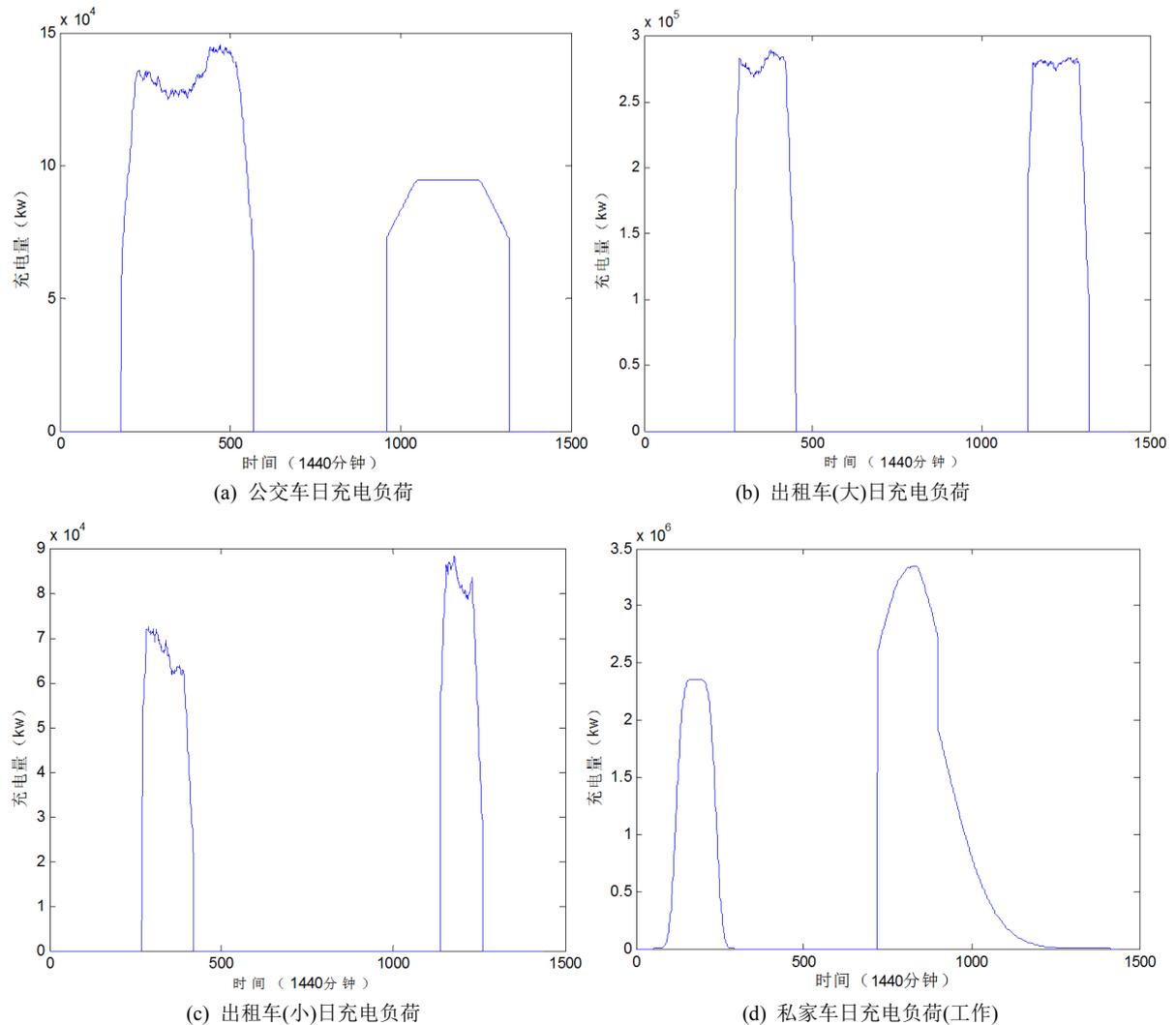
利用蒙特卡洛仿真抽取电动汽车的起始充电时刻与起始充电电量，得到每辆汽车的充电持续时间，再将每辆电动汽车的有效充电功率进行叠加，即可得到所有电动汽车的日充电负荷曲线。图 2 为电动汽车负荷模型求解流程图。

图 3 为电动汽车日负荷曲线。通过对充电功率曲线分析可以看出：由于电动公交车白天时段采用快速充电，所以电动公交车在白天的负荷峰值相对较高；电动出租车在任何时段都采用相同的充电方式，所以两个充电段的充电负荷峰值基本相同；又因为大班次与小班次充电时间不同，所以需要分别建立模型。其中大班次出租车最大峰值时间约为中午 12:00 时；小班次最大峰值时间约为 14:30；电动私家车在工作日的出行时间与居民的上下班高峰时间基本吻合，周末的最大充电负荷峰值时间约为 22:00 时；由于电动私家车的基数较大，所以总的电动汽车负荷曲线与电动私家车的负荷曲线类似。

4. 电动汽车数量预测

若要对电动汽车的充电负荷进行预测，电动汽车的数量预测是其基础。电动汽车的基数大小直接反映了电动汽车的用电需求。样本数据来自于北京市电动汽车 2007 至 2017 年的电动汽车的统计运营。表 4 为电动汽车历史保有量数据。

本文采用 BP 神经网络实现电动汽车数量的预测。图 4 为神经网络预测电动汽车保有量流程图。



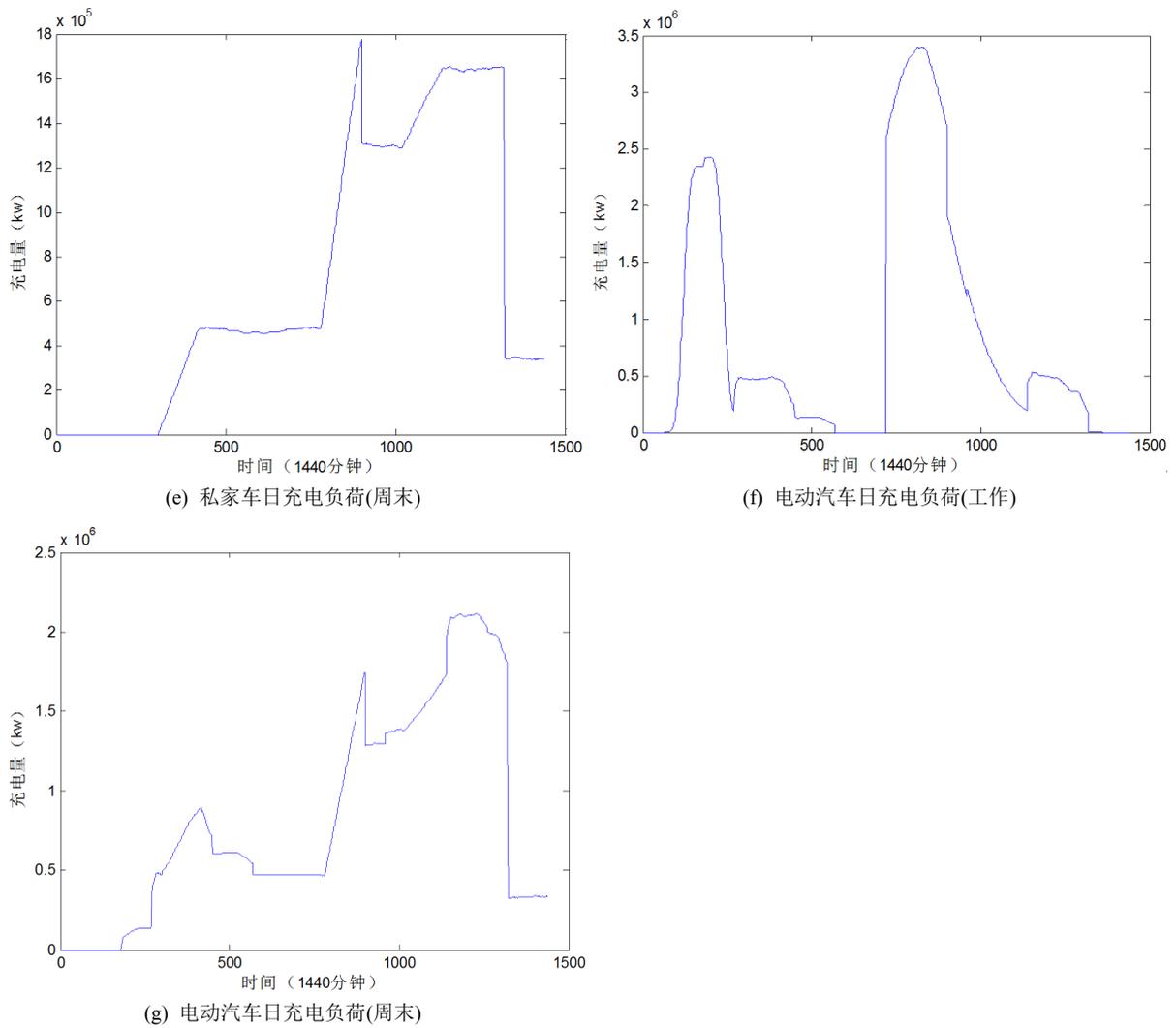


Figure 3. Charging load curve of various types of EVs in Beijing 2017

图 3. 北京市 2017 年各类型电动汽车充电负荷曲线

对于 BP 神经网络算法来说，最重要的部分为 BP 神经网络模型及其参数设置。本文通过对不同节点数目进行仿真，最终采用中间层节点数为 10 的 BP 网络结构。

通过 BP 神经网络模型对 2018 年~2020 年北京市电动汽车保有量进行了预测，表 6 为预测时采用的神经网络结构和参数，表 5 预测误差，表 7 为预测结果，可以看到未来电动汽车均呈现不断增长的趋势，且 2019 年增长最为明显。

Table 4. Historical data of EV quantity

表 4. 电动汽车数量历史数据

| 日期 | 公交车(辆) | 私家车(辆) | 出租车(辆) | 汽车总量(辆) |
|---------|--------|--------|--------|---------|
| 2011/01 | 100 | 6220 | 50 | 6370 |
| 2011/06 | 321 | 15,235 | 632 | 19,188 |
| 2012/01 | 861 | 30,420 | 950 | 32,231 |
| 2012/06 | 1023 | 35,624 | 1506 | 38,153 |

Continued

| | | | | |
|---------|------|---------|--------|---------|
| 2013/01 | 1350 | 48,620 | 2050 | 52,020 |
| 2013/06 | 1520 | 53,216 | 1923 | 56,659 |
| 2014/01 | 1839 | 74,521 | 4568 | 73,609 |
| 2014/06 | 1950 | 85,020 | 6200 | 81,039 |
| 2015/01 | 2342 | 96,432 | 8956 | 93,562 |
| 2015/06 | 2832 | 106,700 | 9430 | 108,220 |
| 2016/01 | 3534 | 118,699 | 13,250 | 119,664 |
| 2016/06 | 3921 | 131,400 | 15,600 | 135,870 |
| 2017/01 | 4500 | 74,521 | 4568 | 151,500 |

Table 5. Prediction error analysis**表 5.** 预测误差分析

| | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 节点数 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 相对误差 | 0.022 | 0.031 | 0.021 | 0.023 | 0.019 | 0.024 | 0.020 | 0.019 | 0.025 | 0.027 |

Table 6. Historical data of EV quantity**表 6.** BP 神经网络模型结构及参数

| 网络结构 | 参数 | 函数/个数 |
|-------|----------|------------|
| 传递函数 | 中间层传递函数 | tansig 函数 |
| | 输出层传递函数 | Purelin 函数 |
| | 输入层神经元个数 | 1 |
| 神经元个数 | 中间层神经元个数 | 10 |
| | 输出层神经元个数 | 1 |
| | 最大迭代次数 | 1000 |
| | 误差进度目标 | 0.001 |

Table 7. EV quantity forecast from 2018 to 2020**表 7.** 2018 年至 2020 年电动汽车预测量

| 年份 | 公交车(辆) | 私家车(辆) | 出租车(辆) | 汽车总量(辆) |
|------|--------|---------|--------|---------|
| 2018 | 4873 | 148,970 | 15,197 | 169,040 |
| 2019 | 5558 | 157,560 | 18,259 | 181,377 |
| 2020 | 5978 | 159,230 | 19,963 | 185,171 |

5. 负荷预测结果

结合不同类型的电动汽车负荷模型以及电动汽车数量预测结果,即可得到不同类型电动汽车的负荷预测结果。图 5 为 2018~2020 年电动汽车总日充电负荷曲线。

总的电动汽车充电负荷曲线趋势与电动私家车的充电负荷曲线趋势近似,原因是电动私家车基数较大。电动汽车的充电负荷存在峰值。在工作日,用电高峰一般集中在上午九点以及下午七点左右,因为该时段是居民早晚上下班高峰之后,电动汽车在运行之后需要补充电能;在周末,电动汽车全天都有用电需求,但主要集中在夜晚,原因是第二天电动汽车的使用补充电能。这主要是由于工作日电动私家车与其他类型电动汽车的用电时间相接近,所以导致工作日的最大功率相对较高;而周末电动私家车用

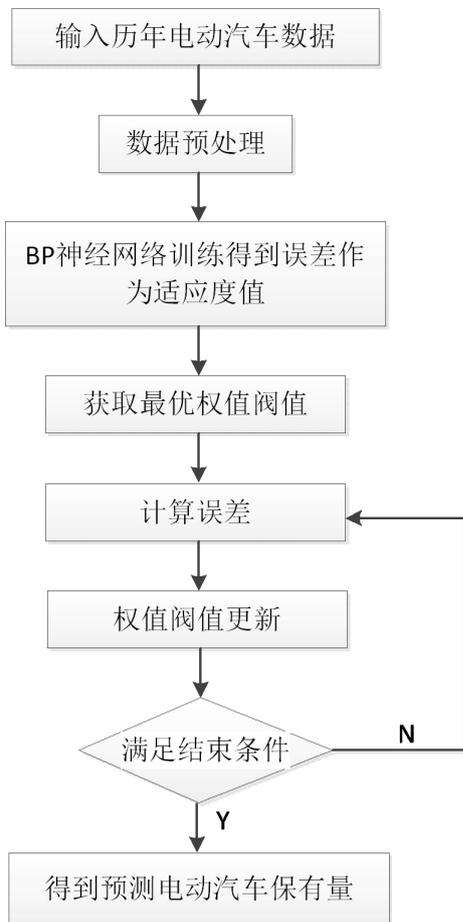
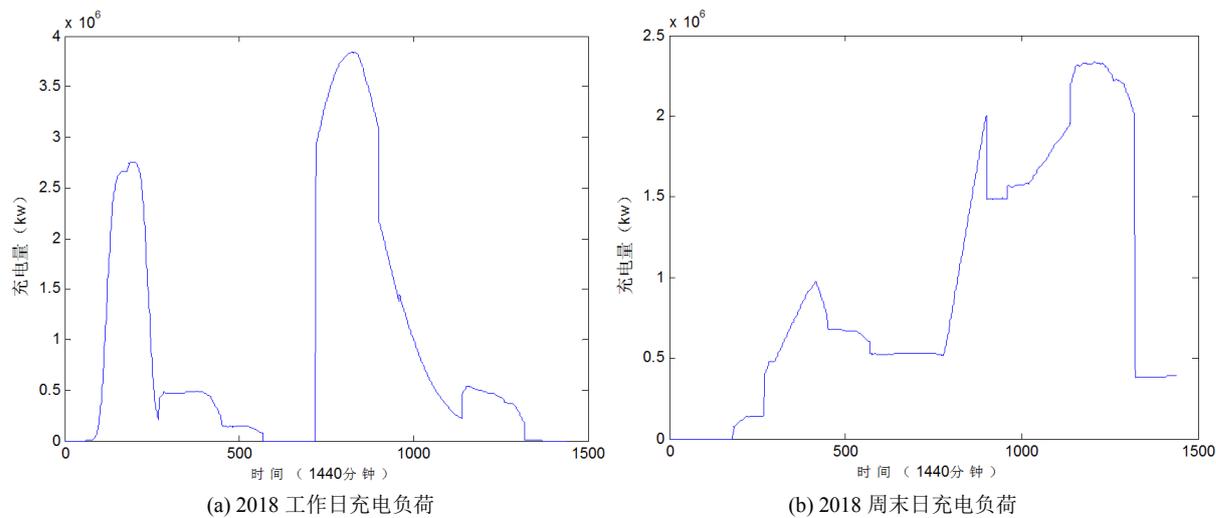


Figure 4. Flow chart of EV quantity prediction
 图 4. 电动汽车数量预测流程图

电时段相对较分散，导致周末的用电峰值小于工作日时的用电峰值。

综上所述，在电动汽车充电负荷的高峰期，应该增加电网电能的输送及稳定性控制，以应对不平衡负荷的冲击，保证电网的可靠运行。



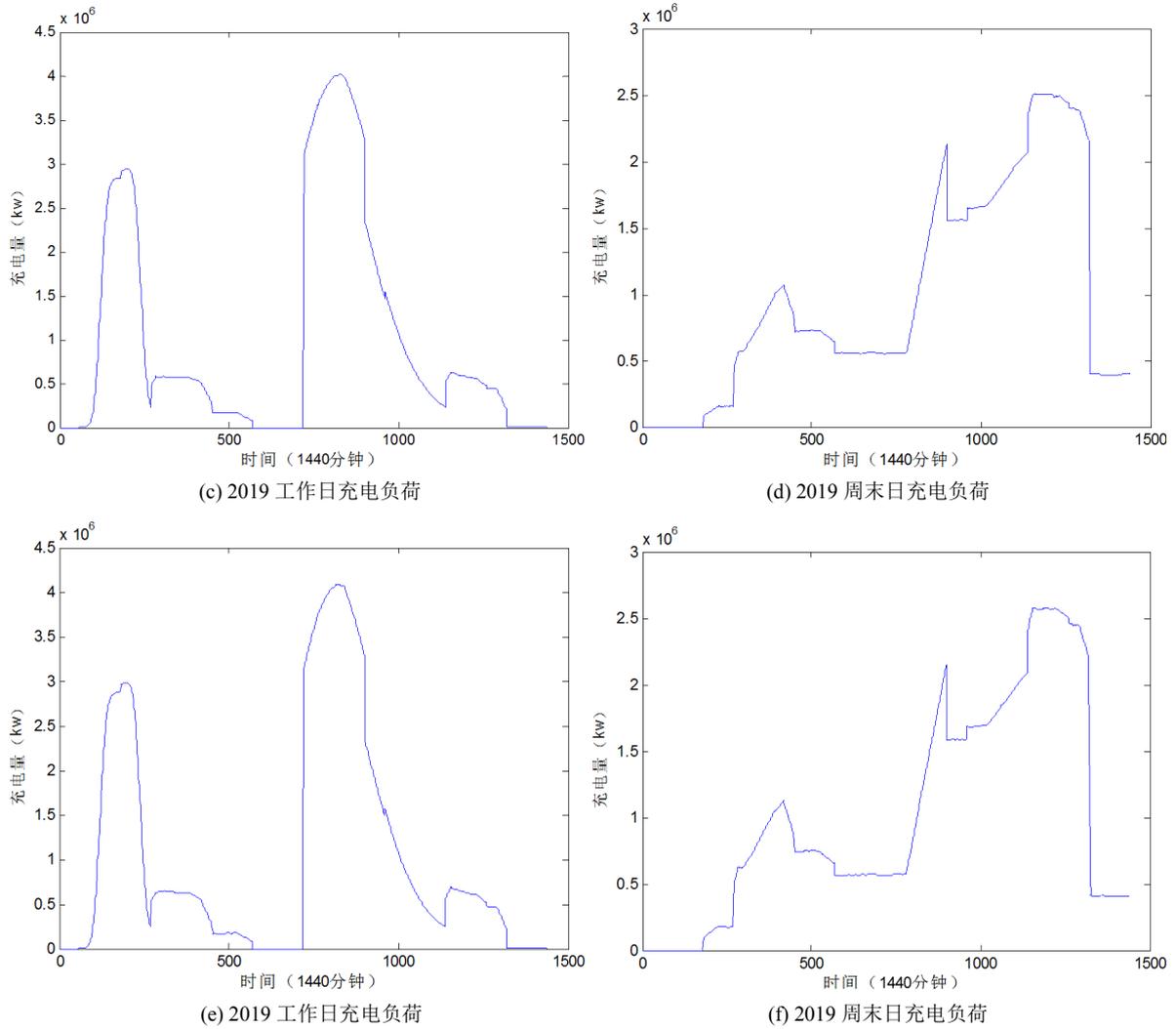


Figure 5. Total daily load prediction curve of EVs
图 5. 电动汽车总日负荷预测曲线

6. 结束语

本文根据电动汽车的类型、充电特性、锂电池的相关参量以及用户特性等，分别建立了不同类型、不同用电习惯下的电动汽车充电负荷模型，同时利用 BP 神经网络对未来几年电动汽车的保有量进行预测，将两者进行结合，以北京市电动汽车为例，对北京市未来几年的电动汽车的汽车数量、用电需求进行了预测，并针对该预测进行了分析。该研究可为今后的电网建设提供一定的参考依据，为提前预防电动汽车接入带来的电网冲击提供参考依据，有利于增加电网的稳定性。

参考文献

- [1] 欧阳明高. 我国节能与新能源汽车发展战略与对策[J]. 汽车工程, 2006, 28(4): 317-321.
- [2] 赵俊华, 文福拴, 杨爱民, 等. 电动汽车对电力系统的影响及其调度与控制问题[J]. 电力系统自动化, 2012, 35(14): 2-10.
- [3] 许晓明. 计及电动汽车的配电网规划研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [4] Rotering, N. and Ilic, M. (2011) Optimal Charge Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Deregulated Electricity

Markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, **26**, 1021-1029. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2086083>

- [5] 寇凌峰. 电动汽车大规模接入对电网的影响分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
- [6] 冯国峥. 北京地区电动汽车发展预测与电力公司应对措施[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2011.
- [7] 孟颖. 规模化电动汽车充电负荷特性研究及其对电网的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.

知网检索的两种方式:

- 1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
- 2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org