

The Prediction of Electric Vehicles Charging Load Based on Monte Carlo Simulation

Huan Pan, Wenjuan Qiao, Nan Li

School of Physics Electrical Information Engineering and Ningxia Key Laboratory of Intelligent Sensing for Desert Information, Ningxia University, Yinchuan
Email: 249540592@qq.com, ph0303@126.com

Received: Sep. 17th, 2014; revised: Oct. 20th, 2014; accepted: Oct. 27th, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The charging load of a large number of electric vehicles is predicted in this paper. Based on the trends of electric vehicles in China, the electric vehicles are divided into electric buses, electric taxis, electric officer's car and electric private car according to different use. The charging mode and time of different kinds of electric vehicles are discussed. The Monte Carlo simulation method is applied to determine the starting state of charge (SOC) and the initial charging point. The charging loads of four kinds of electric vehicles are calculated. The corresponding four charging curves and the total curves are obtained via simulation. Through analyzing the character of the curves, the influence factors of electric vehicles charging load in future are summarized and the suggestion for charging equipment building is provided.

Keywords

Electric Vehicles, Monte Carlo Simulation, Charging Load, Charging Mode

基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电负荷预测

潘 欢, 乔文娟, 李 楠

宁夏大学, 物理电气信息学院及宁夏沙漠信息智能感知重点实验室, 银川
Email: 249540592@qq.com, ph0303@126.com

收稿日期: 2014年9月17日; 修回日期: 2014年10月20日; 录用日期: 2014年10月27日

摘要

本文主要对未来各类电动汽车大规模充电时所造成的电网负荷进行预测。基于现有中国电动汽车的发展趋势，根据用途不同，分为电动公交车、电动出租车、电动公务车、电动私家车；讨论不同类型电动汽车充电时对应的充电方式及充电时段，采用蒙特卡洛模拟法抽取起始荷电状态、起始充电时间；计算四种电动汽车的充电负荷，应用C++语言仿真模拟对应负荷特性曲线，并计算得到总体负荷曲线；通过分析曲线特征，总结未来电动汽车充电负荷主要影响因素，为电动汽车的充电设施建设提供指导性意见。

关键词

电动汽车，蒙特卡洛模拟，充电负荷，充电方式

1. 引言

众所周知，能源短缺与环境污染是 21 世纪全球关注的两大难题，同时也将是未来社会发展的重大挑战。对于发展中国家尤其像我国这样的汽车大国，能源动力系统所面临挑战的尤为严峻。电动汽车以其良好的环保、节能特性，成为现今国际汽车发展的潮流和热点之一[1]。据工业和信息化部电动汽车发展战略研究报告预测，2030 年全国电动汽车保有量将达到 6000 万辆[2]。电动汽车以充电电池为动力，大量地接入电网充电势必会对电网造成严重的冲击。因此，建立适当的电动汽车充电负荷模型，不仅便于计算电动汽车的充电负荷，更对电力系统的运行和规划都具有重要的指导意义[3]。

电动汽车的充电负荷在空间和时间上都具有很大的随机性和间歇性，影响因素众多，主要包括电动汽车保有量、起始荷电状态(State of Charge, SOC)、充电功率、充电时间和动力电池容量。文献[4]主要对影响充电需求的各种因素进行建模，通过仿真算法比较不同类型电动汽车车型、不同充电功率、不同渗透率、不同充电情景对充电需求的影响程度。文献[5]采用蒙特卡洛仿真方法分析不同渗透率下电动汽车充电对两个岛屿配电网网损的影响。实际工作中，每辆电动汽车的起始荷电状态应该不同，但[5]中仅假设起始荷电状态的一致。文献[6]在给定的电动汽车充电规模和 SOC 的情况下，研究了电动汽车的充电负荷。文献[7]基于 3 种电动汽车充电模式，依据各自的特点建立充电负荷模型，求取负荷，但仅仅考虑了临沂地区。文献[8]使用特定分析法，针对电动汽车类型提出假设条件，并研究有限供电范围内电动汽车充电负荷所产生的影响。文献[9]在研究电动汽车充电负荷时，仅考虑了电动公交车和电动私家车对电网负荷的影响。文献[10]分析了充电时长差异的影响，考虑了充电能力限制等多种因素，研究电动汽车充电站车流量对电网的冲击。文献[11]针对换电池模式下的电动汽车充电负荷进行建模，并对其采用了有序充电的策略，但没有考虑常规充电和快速充电的情况。通过对上述研究的分析可知，随着电池技术的不断进步，电动汽车充电研究已得到国内外众多专家学者的重视，并且建立了各种不同的充电负荷模型。然而，必须指出的是有关充电负荷的研究依然存在着不足，例如对电动汽车类型与充电方式的考虑不全面等。

因此，本文按照实际需求将电动汽车划分为公交车、出租车、公务车、私家车 4 大类，不同类型的电动汽车充电特性不同，将采用蒙特卡洛模拟方法抽取起始荷电状态、起始充电时间来并计算 4 类电动汽车的充电负荷，求取负荷特性曲线，通过曲线对中国未来电动汽车充电负荷进行预测分析。

2. 不同车辆运营及充电特性分析

不同类型电动汽车的充电特性、充电时间和频率都不尽相同。本节将对 4 种类型的电动汽车充电特性进行分析，得到适当的充电时段、充电频率、起始充电容量分布和起始时间分布。基于车辆的日均行

驶里程及能耗，得到车辆的充电负荷。

2.1. 公交车

公交车的行驶习惯一般比较固定。早上 6:00 左右发车，晚上 10:00 左右收车，中间不间断，共计 16 小时。通过公交车运营调研情况可知，公交车行程通常是确定的，双程大约为 70 km，每辆车每天大约可以往返四趟，日耗电量约为 275 kW·h [12]。目前示范运行的电动公交车充满电的额定行驶里程为 150~200 km。

针对公交车运营情况，提出两种充电策略：白天运营时段，不能长时间停留，一般采用快速充电；夜间停运时段，可以长时间逗留，一般采用常规充电。公交车运行早、晚高峰期分别为 7:00~8:00，17:00~18:00。根据上述情况，制定以下的充电措施：白天充电时间为 9:30~16:00，晚上充电时间为 23:00~5:00。假定电动公交车每天需要充电 2 次，每次充电的起始 SOC 服从正态分布 $N(0.5, 0.01)$ [13]。

2.2. 出租车

出租车的行驶路线比较灵活，可以在无载客时段选择相对较近的充电站充电。本文所研究的电动出租车以充电为主，日均行驶里程为 350~400 km 左右，每天需要充电 2 次。

根据出租车的运营需求，每辆车都是两班制运行，会在交班前充满电。交班时间一般为早上 6:00 和下午 16:00 左右。为了带来多的效益，白天运营时段经常选择快速充电；夜间休息的时段选择在就近的充电场所进行常规充电。根据出租车的交接班时间和休息时间，选择在中午时间 11:30~14:00 进行快速充电，而在夜间 2:00~5:00 进行常规充电。一天的运营过程中需要充电 2 次，起始 SOC 满足正态分布 $N(0.3, 0.01)$ 。

2.3. 公务车

公务车一般用于公务用途，行驶路程不确定，但每天基本是白天运行，夜间休息。公务车在不执行公务时，可以选择对其进行充电。一般公务车夜间停留在指定的停车场，所以在夜间可对其进行常规充电，即 18:00~7:00，起始 SOC 满足 $N(0.4, 0.01)$ 。

2.4. 私家车

据调查，中国汽车平均每年的行驶里程数约为 15,000~20,000 km，每天的行驶里程为 40 km [14]。私家车在工作日的主要用途为上、下班，节假日的主要用途为休闲娱乐，走亲访友等。针对每天的出行情况，工作日，私家车一般停留在小区或单位停车场；节假日，私家车一般停留在小区或商场超市停车场。小区和单位停车场内一般会长时间逗留，因此可采用常规充电。商场超市停车场停留的时间有限，必须限制充电时间，采用快速充电。

私家电动汽车的上班出行高峰期为 7:00~8:00，充电时间为上班时间至下班时间。下班出行的高峰期为 17:00~19:00，充电时间为回到家时间至次日早上 6:00。节假日出行时，可以选择晚上在小区停车场充电或白天时段在公共停车场进行快速充电。按私家车平均每天的行驶里程数来看，每天只需充电一次，起始 SOC 服从正态分布 $N(0.6, 0.01)$ 。

3. 不同车辆运营及充电特性分析

3.1. 电动汽车充电负荷计算模型

首先计算单辆车的充电负荷，将所有电动汽车充电负荷累加，即可得到总充电负荷曲线。建模的难点在于电动汽车起始充电时间与起始 SOC 的不确定性，因此选择蒙特卡洛模拟法抽取起始充电时间和起始 SOC，进而得到充电所需时间。计算电动汽车充电负荷以一天为单位，将一天分为 1440 min，令 P_i 表

示第 i 分钟所有电动汽车充电负荷，则总充电功率为：

$$P_i = \sum_{n=1}^N P_{n,i}, \quad i=1,2,\dots,1440 \quad (1)$$

其中 N 为电动汽车总数量， $P_{n,i}$ 为第 n 辆车在 i 时刻的充电功率。

3.2. 基于蒙特卡洛的电动汽车充电负荷计算方法

假设电动汽车充电时间不受控制，为“即插即充”方式。对不同类型的电动汽车，确定其充电行为。对于常规充电的电动汽车，没有充电时长的限制，可基于蒙特卡洛方法抽取起始 SOC，在满足充电所需时长的约束条件下，缩小起始充电时间抽样范围，抽取起始充电时间，进行负荷计算；快速充电的电动汽车，同样基于蒙特卡洛方法抽取起始充电时间，计算充电限制时间长度，在满足充电所需时长的限制下，抽取起始充电时间，进行负荷计算。流程图如图 1 所示。

本文拟采用常规充电时的充电电流为 0.2 C，从 0 电量到充满所需时间为 5 h；快速充电时的充电电流为 1.25 C，充电时间限定为 80 min。该算法应用蒙特卡洛模拟方法抽取起始荷电状态和起始充电时间，原理是将符合均匀分布 $u(0,1)$ 的随机点转换为符合标准正态分布 $N(0,1)$ 的随机点，由概率知识可知，要转为一般正态分布 $N(e,v)$ ，只需进行简单计算 $p \times v + e$ 即可，其中 p 表示概率。

4. 电动汽车充电负荷曲线预测

4.1. 各种类型电动汽车保有量预测

随着人民生活水平的不断提高和汽车价格的不断下降，汽车已成为人们生活的必需品。截止 2010 年末，中国汽车保有量为 7801.83 万辆。汽车保有量的预测主要是利用过去和当前的观测值对未来的值进行估计。主要的预测方法有：时间序列法、弹性系数法、回归分析法、路网容量法、灰色模拟法、人工神经网络法、支持向量机法、混沌时间序列以及组合预测法[15]-[17]。首先对未来中国的各种类型的汽车数量进行预测，假设电动公交车、电动出租车、电动公务车在 2015、2020、2030 年所占比例分别为 5%、15% 和 30%，私家电动汽车所占比例分别为 5%、10% 和 30%，从而得到 2015、2020、2030 年各类电动汽车的数量，具体数据如表 1 所示。

4.2. 参数设置

基于 4 种类型电动汽车的充电特性的分析，得出它们基本参数，包括充电次数、充电时段、是否有充电时长的限制、起始充电容量分布、起始时间分布，如表 2 所示。

由表 2 可知，电动公交车每天需要充电 2 次，起始充电时间服从均匀分布，充电功率为 21 kW。电动出租车每天也需要充电 2 次，中午时间需要快速充电，充电时间为 80 min，快速充电时起始时间服从直角梯形分布，常规、快速充电功率分别为 14 kW、90 kW。电动公务车每天需要充电 1 次，一般在夜间进行常规充电，充电功率为 7kW，起始时间分布服从均匀分布。电动私家车充电在工作日和节假日的参数不同，在工作日一般需要充电 1 次，在不同充电场合所占的比例不同，单位停车场和小区停车场进行常规充电，起始时间分布分别服从 $N(9,0.25)$ 、 $N(19,1.25)$ ，充电功率为 7 kW。在商场超市停车场进行快速充电，限制充电时间为 80 min，起始时间服从直角梯形分布，充电功率为 45 kW。私家电动车在节假日时充电概率为 0.8，不同的时间段充电比例不同，起始充电容量呈现正态分布，起始时间分布服从均匀分布和直角梯形分布，充电功率与工作日一致。

4.3. 电动汽车充电负荷曲线

应用 C++ 语言编程，分别输入 4 种类型电动汽车的数量，将一天分为 1440 min，当电动汽车接入电

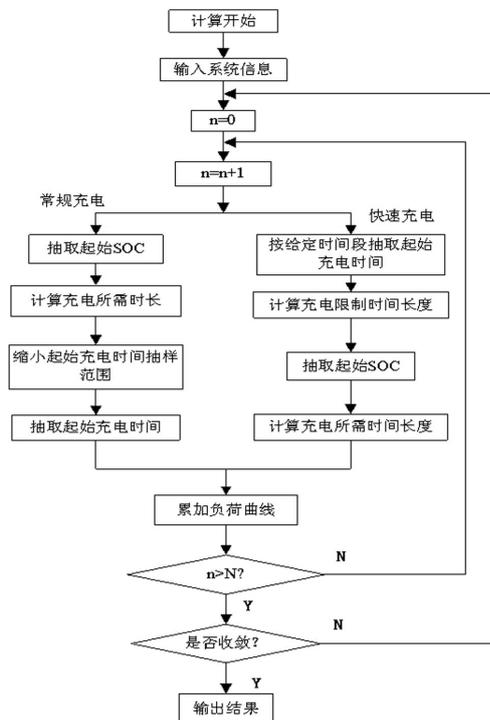


Figure 1. The flowchart of electric vehicles charging based on Monte Carlo simulation
图 1. 基于蒙特卡洛模拟的电动汽车充电流程图

Table 1. The predicted results of the number of electric vehicles in China
表 1. 中国电动汽车保有量预测结果

年份	公交车	公务车	出租车	私家车
2015 年	3.33 万辆	34.04 万辆	7.97 万辆	234.96 万辆
2020 年	13.08 万辆	133.70 万辆	31.30 万辆	829.86 万辆
2030 年	38.56 万辆	436.99 万辆	102.41 万辆	5304.90 万辆

Table 2. The analysis of charging character of electric vehicles
表 2. 电动汽车充电特性分析

车辆类型	日充电次数	充电时段	充电时长是否有限制	各时段充电概率	起始充电容量分布	起始时间分布
公交车	2	9:30~16:00	否	1	N(0.5,0.01)	均匀分布
		11:00~05:00	否	1	N(0.5,0.01)	
出租车	2	00:00~5:00	否	1	N(0.3,0.01)	均匀分布
		11:30~14:00	80 min	1	N(0.3,0.01)	直角梯形分布
公务车	1	18:00~7:00	否	1	N(0.4,0.01)	均匀分布
		8:00~17:00	否	0.2	N(0.6,0.01)	N(9,0.25)
私家车工作日	1	19:00~7:00	否	0.7	N(0.6,0.01)	N(19,1.25)
		19:00~22:00	80 min	0.1	N(0.6,0.01)	直角梯形分布
		20:00~5:00	否	0.5	N(0.6,0.01)	均匀分布
私家车节假日	0.8	0:00~7:00	否	0.1	N(0.6,0.01)	均匀分布
		12:00~22:00	80 min	0.2	N(0.6,0.01)	直角梯形分布

网充电时，计算每一分钟电动汽车的充电功率。每隔 15 min 求取一个平均值，最后出绘制电动汽车充电负荷曲线如图 2 所示。

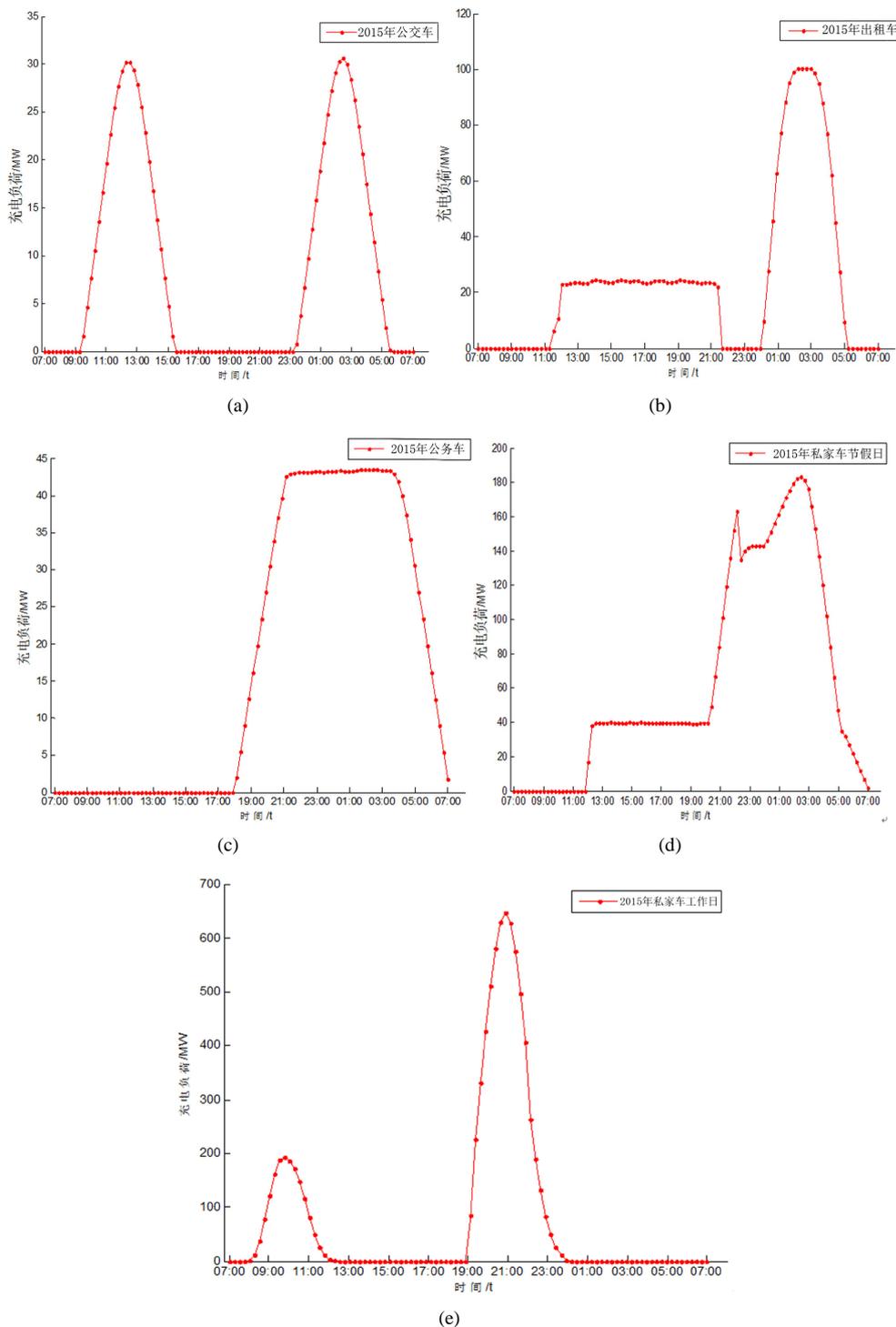


Figure 2. Load curves of all kinds of electric vehicles: (a) Electric buses in 2015; (b) Electric taxis in 2015; (c) Electric officer's cars in 2015; (d) Electric private cars in working day in 2015; (e) Electric private cars in rest day in 2015

图 2. 2015 年各类电动车的充电负荷曲线: (a) 2015 年电动公交车; (b) 2015 年电动出租车; (c) 2015 年电动公务车; (d) 2015 年电动私家车工作日; (e) 2015 年电动私家车休息日

图 2(a)~2(e)为 2015 年各种类型的电动汽车充电负荷曲线,私家车按充电特性不同可以分为工作日充电负荷曲线和节假日工作负荷曲线。由图可知,不同类型的电动汽车,其充电负荷曲线截然不同。

Visual C++ 6.0 环境下运行程序,将图 2 中的 4 种类型电动汽车充电负荷进行叠加,可以分别得到 2015 年工作日与节假日时的总充电负荷曲线,如图 3、图 4 所示。应用相同的方法,可分别得到 2020、2030 年工作日与休息日的中国电动汽车充电负荷曲线,如图 5、图 6 所示。

4.4. 结果分析

通过分析仿真图可以得到以下几点结论:

- (1) 2015 年工作日充电负荷峰值为 709.06 MW, 节假日充电负荷峰值为 357.49 MW; 2020 年工作日充电负荷峰值为 2537.07 MW, 节假日充电负荷峰值为 6321.82 MW。
- (2) 2015~2030 年,随着电动汽车的逐渐普及,4 种类型的电动汽车充电负荷呈现快速上升趋势。
- (3) 电动私家车将是今后发展的主流,因此未来电动汽车的主要充电负荷来自电动私家车。
- (4) 电动汽车充电的负荷高峰期主要集中在下班后至晚上 10 点左右,产生这个高峰的主要原因是大

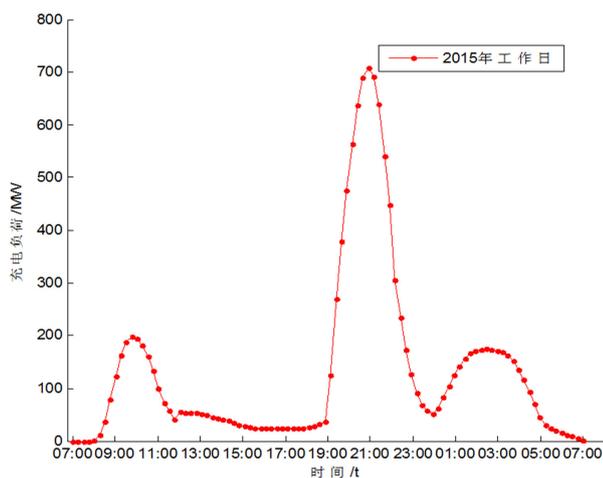


Figure 3. Load curves in working day in 2015

图 3. 2015 年工作日电动汽车充电负荷曲线

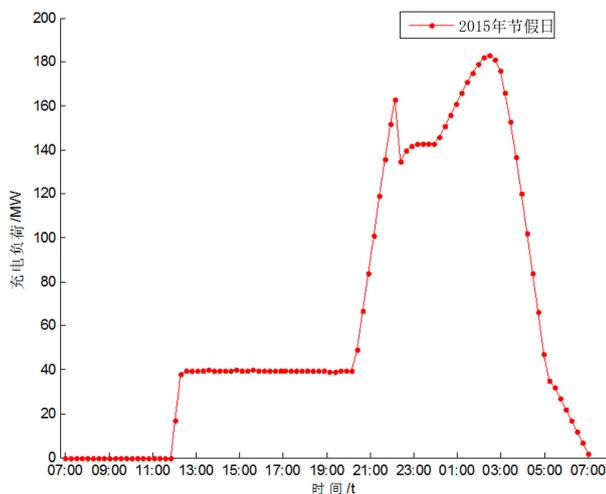


Figure 4. Load curves in rest day in 2015

图 4. 2015 年节假日电动汽车充电负荷曲线

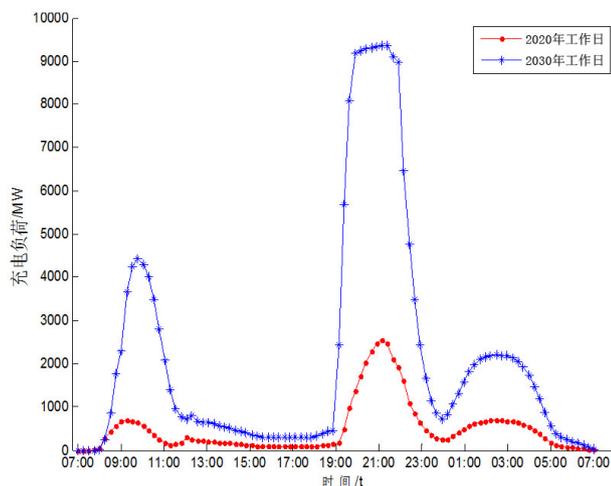


Figure 5. Load curves in working day in 2020 and 2030
图 5. 2020, 2030 年工作日充电负荷曲线

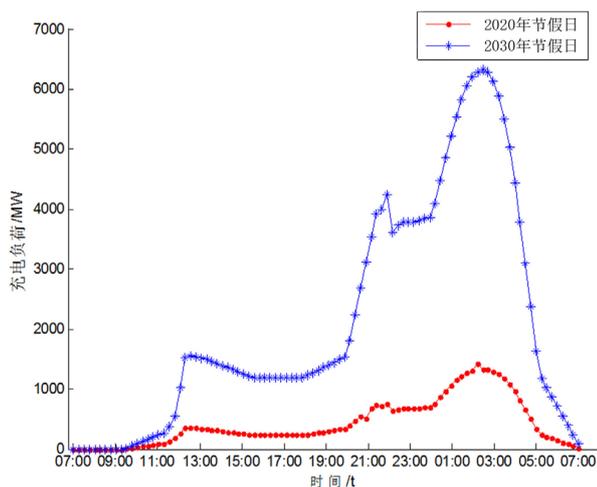


Figure 6. Load curves in rest day in 2020 and 2030
图 6. 2020, 2030 年休息日充电负荷曲线

多数的人选择在下班回家后直接对电动汽车进行充电，造成了负荷的急剧上升。充电负荷具有明显的峰谷差，并且在时间上与电网的用电高峰期基本一致，若未来对电动汽车充电实行有序充电，将为电网减少不小的压力。

5. 结论

本文将电动汽车按不同行驶特性分为公交车、出租车、公务车、私家车以及针对私家车运行时间分为工作日与节假日，依据各种电动车的充电特性，建立了基于蒙特卡洛模拟的充电负荷模型，利用蒙特卡洛模拟得到了充电参数。经过分析和预测 2015、2020、2030 年电动汽车保有量，利用充电参数得到了电动汽车充电负荷曲线预测图，通过对比图形可以发现电动汽车充电负荷特性，这些结果对今后相关部门的电动汽车充电站的建设有重要的参考价值。

基金项目

宁夏大学人才引进科研启动基金(BQD2012004)。

参考文献 (References)

- [1] Bauer, T., Lips, H.P., Thiele, G., et al. (1997) Operational tests on HVDC thyristor modules in a synthetic test circuit for the Sylmar East Restoration Project. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **12**, 1151-1158.
- [2] 杨孝纶 (2007) 电动汽车技术发展趋势及前景(上). *汽车科技*, **6**, 10-13.
- [3] 张文亮, 武斌, 李武峰, 等 (2009) 电动汽车我国纯电动汽车的发展方向及能源供给模式的探讨. *电网技术*, **33**, 1-5.
- [4] 李建祥 (2013) 电动汽车充电需求负荷建模方法研究. *建筑电气*, **32**, 45-48.
- [5] 杨冰, 王丽芳, 廖承林 (2013) 大规模电动汽车充电需求及影响因素. *电工技术学报*, **28**, 22-27.
- [6] Clement, K., Haesen, E. and Driesen, J. (2010) The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, 371-380.
- [7] Soares, F.J., Lopes, J.A.P. and Almeida, P.M.R. (2010) A Monte Carlo method to evaluate electric vehicles impacts in distribution networks. In: *Proceedings of IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply*, IEEE, Waltham, 365-372.
- [8] Kristien, C.N., Edwin, H. and Johan, D. (2010) The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, **25**, 371-380.
- [9] 荆朝霞, 钟童科, 林志龙, 等 (2013) 电动汽车充电行为对电网负荷曲线的影响. *南方电网技术*, **7**, 80-84.
- [10] 杨少兵, 吴命利, 姜久春 (2013) 电动汽车充电站负荷建模方法. *电网技术*, **37**, 1190-1195.
- [11] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等 (2012) 换电模式下电动汽车电池充电负荷建模与有序充电研究. *中国电机工程学报*, **32**, 1-7.
- [12] 樊扬, 左郑敏, 朱浩骏, 等 (2011) 电动汽车充电模式对广东电网负荷特性的影响. *广东电力*, **24**, 58-61.
- [13] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华 (2011) 电动汽车充电负荷计算方法. *电力系统自动化*, **35**, 36-42.
- [14] 贾洪旭 (2008) 奥运电动汽车电池管理系统的研究与设计. 硕士学位论文, 北京交通大学, 北京.
- [15] Sandels, C., Franke, U., Ingvar, N., et al. (2010) Vehicle to grid—Monte Carlo simulations for optimal aggregator strategies. *Proceedings of International Conference on Power System Technology*, Hangzhou, 24-28 October 2010, 1-8.
- [16] 陈帝伊, 柳焯, 马孝义 (2012) 基于径向基函数神经网络的混沌时间序列相空间重构双参数联合估计. *物理学报*, **61**, 100501.1-100501.9.
- [17] Chen, D.Y. and Han, W.T. (2013) Prediction of multivariate chaotic time series via radial basis function neural network. *Complexity*, **18**, 55-66.