

电动汽车充电负荷时空分布预测

李丹奇¹, 郑建勇¹, 史明明², 李陶然¹, 沙浩源¹, 梁馨予¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:采用最小二乘法与灰色关系度理论建立了电动汽车保有量预测模型,将车辆状态转移矩阵引入传统停车需求模型,预测了电动汽车随时刻变化的实际泊车分布特性;基于蒙特卡洛方法,针对电动私家车、电动公交车、电动出租车、电动公务车各自对应的充电需求,分别模拟了其充电行为,推测出了不同用地类型区域的电动汽车充电负荷曲线。文中结合徐州市公共汽车运营现状,给出了大型充电站的规划布局建议,为充电站规划建设提供理论支撑。

关键词:充电负荷;蒙特卡洛;最小二乘法;灰色关系度;时空分布

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)01-0075-09

0 引言

为了推动汽车产业可持续发展、缓解环境和能源压力,新能源电动汽车的发展受到了越来越多的关注。规模化电动汽车的接入将对未来电力系统的运行和规划产生影响^[1]。电动汽车充电负荷的时间、空间充电随机性较大,为其充电负荷的准确预测带来了很大的挑战。

目前已有学者对预测新能源汽车充电负荷的方法进行了研究。文献[2]模拟了单台电动汽车的充电负荷,得到日负荷曲线。但只考虑了同种型号的私家车且假设每次充电行为均充满为止,仿真结果与实际情况存在一定偏差。文献[3]提出对建设用地进行分类,建立不同种类区域的停车需求模型。但这种方法仅从建设用地的面积进行预测,没有考虑到用户行为的随机性。文献[4]讨论了未来主要电动汽车类型对应的充电方式和充电时间,但没有涉及负荷的空间分布预测问题,且该文献认为常规充电与快速充电方式均是恒功率过程,预测结果在准确度上有所欠缺。以上文献中所建立的预测模型多只针对私家车进行仿真,对不同电动汽车的充电方式、充电功率、用户个性化行为的研究较为欠缺,并且未提及不同建设用地区域中充电负荷的明显差异。

因此,文中基于徐州市实际数据,对电动私家车、电动公交车、电动出租车、电动公务车这4种车型的充电需求和充电行为进行分析。采用最小二乘法与灰色关系度理论预测了4种车型的保有量;基于不同类型车辆的停车行为,建立泊车时空分布

模型,并结合每种车型各自的用户个性化行为,推测出不同用地类型区域的电动汽车充电负荷曲线。并结合徐州市公共汽车运营现状,给出大型充电站的规划布局建议,为充电站规划建设提供理论支撑。

1 电动汽车保有量预测

1.1 电动汽车保有量预测模型

新能源汽车行业发展受诸多因素影响,文中采用最小二乘法将影响因素与保有量之间的联系转化为数值,通过具体数据更直观地描述保有量变化趋势。在文中所建立的保有量预测模型中,将影响电动汽车保有量的因素分为可完全量化因素 f_m 与不可完全量化因素 f_u 。

$$y = (k_1 f_{m1} + k_2 f_{m2} + \dots + k_n f_{mn}) f_{u1} f_{u2} \dots f_{un} \quad (1)$$

对于 f_m ,直接给这个因素赋值系数 k 作为权重;对于 f_u ,采用专家评价法来评价该因素对电动汽车保有量的影响程度。

对所选取的因素进行无量纲化修正,消除各个因素之间的单位和数量级的相互影响,与电动汽车每年保有量进行拟合,得到误差平方和最小的系数矩阵以及各个因素与电动汽车保有量之间的关系模型^[5]。

1.2 可完全量化因素

文中采用灰色关联度理论处理可完全量化因素。灰色关联分析可以衡量因素间关联程度的高低。两个因素变化趋势越相似,则二者的灰色关联度越高。

影响电动汽车保有量的可完全量化因素包括污染物的排放、使用成本、购买价格、GDP、汽车工业生产总产值、原油产量、汽车研发经费、驱动电机型号

数量和分散式充电桩数量等。将这些因素作为比较数列,电动汽车的保有量作为参考数列,计算出各个比较数列与参考数列之间的灰色关联度 r_i ,如式(2)、式(3)所示,从而找出变化趋势最接近保有量变化趋势较的因素,筛选灰色关系度 r_i 大于 75% 的因素作为有效因素。

$$\xi_{i(k)} = (\min_i \min_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}| + \rho \max_i \max_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|) / (|x_{0(k)} - x_{i(k)}| + \rho \max_i \max_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|) \quad (2)$$

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{i(k)} \quad (3)$$

式中: ρ 为分辨系数,一般在 0~1 之间,通常取 0.5; x_0 为无量纲化的电动汽车保有量, x_i 为无量纲化的可完全量化因素; $\min_i \min_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|$ 和 $\max_i \max_k |x_{0(k)} - x_{i(k)}|$ 分别为其差值的最小值和最大值; $\xi_{i(k)}$ 为关联系数; n 为总年份。

1.3 不可完全量化因素

对于不可完全量化因素对电动汽车保有量的影响的评估,采用专家评价法^[6]。专家评价法是通过实际情况进行统计,建立模型,规划每种程度所对应的档位,让专家进行档位的选择,以此统计出具体分数作为评估结果。设定专家有 5 个档位的评价指标评价 f_u 对电动汽车发展的影响,分别是 A (5 分)、B (4 分)、C (3 分)、D (2 分)、E (1 分)。设 A 为提升保有量 100%, B 为提升保有量 50%, C 为提升保有量 0%, D 为减少保有量 50%, E 为减少保有量 100%。按照式(4)将各评分量化,其中 ω 为专家的评分。

$$P\% = (\omega - 3) \times 100 \times 0.5\% \quad (4)$$

2 充电负荷空间分布预测

电动汽车充电是在静止状态下进行的,充电负荷的时空分布^[7]与其停泊规律密切相关^[8]。因此可通过求取车辆的停车分布间接预测充电负荷的时空分布。停车空间分布基本模型如式(5)所示。

$$P_l = E_l S_l \lambda_l \quad (5)$$

式中: P_l 为停车需求; E_l 为 l 类用地单位面积停车需求; S_l 为 l 类用地建筑面积; λ_l 为 l 类用地与停车需求之间的修正值。但此模型无法反映车辆分布随时间变化的状态。

在此基础上,用一个状态转移矩阵^[8]表示相邻时刻间停车分布的变化情况,设某区域车辆状态变化矩阵为:

$$S_l^t = [N_{l,in}^t \quad N_{l,out}^t] \quad (6)$$

式中: $N_{l,in}^t$ 为 t 时刻驶入 l 类地区的车辆数; $N_{l,out}^t$ 为 t 时刻驶离 l 类地区的车辆数。相应的状态转移矩阵为:

$$T_l = \begin{bmatrix} n_{l,inin}^t & n_{l,inout}^t \\ n_{l,outin}^t & n_{l,outout}^t \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $n_{l,inin}^t$ 为车辆 $t-1$ 时刻和 t 时刻均停留在 l 地区的概率; $n_{l,inout}^t$ 车辆为 $t-1$ 时刻停泊在 l 地区, t 时刻驶离 l 地区的概率; $n_{l,outin}^t$ 车辆为 $t-1$ 时刻不在 l 地区, t 时刻驶入 l 地区的概率; $n_{l,outout}^t$ 车辆为 $t-1$ 时刻和 t 时刻均不在 l 地区的概率。其中:

$$n_{l,inout}^t = \frac{\Delta N_{l,out}^t}{N n_{l,inin}^{t-1}} = 1 - n_{l,in}^t \quad (8)$$

$$n_{l,outin}^t = \frac{\Delta N_{l,in}^t}{N n_{l,outout}^{t-1}} = 1 - n_{l,outout}^t \quad (9)$$

式中: N 为此类用地电动汽车的保有量; $\Delta N_{l,out}^t$ 为在 $t-1$ 与 t 时刻之间驶出 l 地区的电动汽车数量; $\Delta N_{l,in}^t$ 为在 $t-1$ 与 t 时刻之间驶入 l 地区的电动汽车数量。

$$S_l^t = S_l^{t-1} T_l^t \quad (10)$$

通过 $t-1$ 时刻的状态矩阵可以预测出 t 时刻此类地区的电动汽车停泊数量的变化情况,如式(10)所示。引入车辆变化系数:

$$\Phi_l(t) = (N_{l,in}^t - N_{l,out}^t) / N \quad (11)$$

用以描述该区域内电动汽车数量随时间的变化状况,得到电动汽车时空分布特性:

$$P_l(t) = E_l S_l \lambda_l \Phi_l(t) \quad (12)$$

式中: $P_l(t)$ 为 l 类用地中 t 时刻的实际停车需求量。

3 用户行为预测

电动汽车的用户行为包括电动汽车的型号类别(决定充电功率)、起始充电时间、当天总共行驶的公里数、充电频率等,具有很强的随机性,是影响电动汽车充电负荷曲线的关键性因素。

3.1 私家车

根据江苏省地区的统计数据^[9],小型轿车中比亚迪 QCJ7006BEVF 型纯电动轿车所占市场比重最大,因此文中采用该型号电动轿车模拟电动私家车充电过程。该车型额定参数见表 1。

表 1 比亚迪 QCJ7006BEVF 型参数
Table 1 BYD QCJ7006BEVF parameter

参数	数值
动力电池标称电压/V	316.8
额定容量/(A·h)	200
续航能力/km	320

由参数可知,小型车采用常规充电方式即可满足日常需要,假定所有私家车采用分段充电法进行充电^[10],充电功率在初期增大末期减小,过程很短暂可忽略不计^[11],其余时间均为恒功率不变^[12]。在徐州市实地调研得到电动轿车的充电桩额定电流 32 A,额定电压 250 V,额定充电功率 P 为 8 kW,文中所有常规充电方式均假设为恒功率 8 kW。

采用《国家家庭出行调查—2017》^[13]中的数据统计私家车的出行规律^[14]。按照人们的日常生活习惯,假设每辆汽车最晚抵达家里的时间即电动私家车的起始充电时间,对其进行频率统计并拟合成正态分布;将文献[13]中每辆汽车年平均行驶英里换算为每日平均行程,统计其分布规律^[15-16]如图 1、图 2 所示。

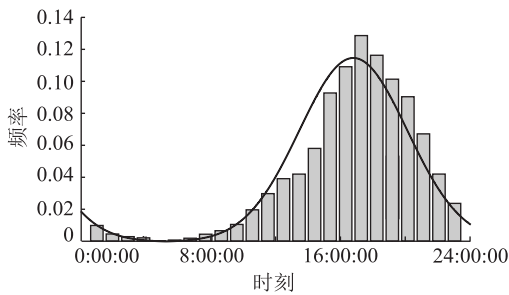


图 1 私家车起始充电时间分布

Fig.1 Initial charging time distribution of private cars

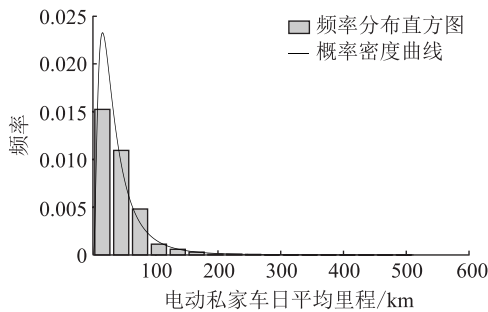


图 2 电动私家车当天总共行驶的公里数分布

Fig.2 The total number of kilometers of electric private cars on the same day

电动汽车接入充电时的电量状态可用式(13)表示,其中 $S_{\text{SOC},0}$ 为出行前的电量状态; L_{max} 为续航能力。若不考虑充电时间限制,电动汽车充电时长可用式(14)表示,其中 H 为充电时长; U 为电动汽车动力电池标称电压; C 为电池额定容量; P 为电功率。

$$S_{\text{SOC}} = S_{\text{SOC},0} - L/L_{\text{max}} \quad (13)$$

$$H = (1 - S_{\text{SOC}})UC/P \quad (14)$$

据上文数据可计算,在满电的情况下,私家车动力电池完全可以满足其一天的需求,合理假设电动私家车一天充电一次。

若私家车停泊在居民区,大部分用户有条件充满。若在工商业区,很大概率停泊在付费的停车场或路边,到离开时间时无论电动汽车是否充满电量,都会停止充电。这时充电时间受到限制,停车时间分布见图 3。

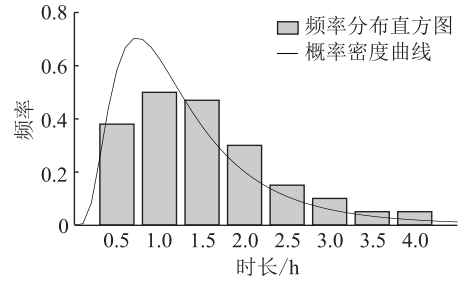


图 3 私家车在工商业区的停车时间分布

Fig.3 Parking time distribution of private cars in industrial and commercial areas

3.2 公交车

徐州市公交车运行模式较固定,型号大部分为宇通 ZK6125BEVGQAA,其额定参数见表 2。充电模式分为 2 种:(1) 每辆公交车到达充电站时立刻采用变电压间歇充电法^[17-18]进行快充,到达发车时间立即停止充电开始出发;(2) 公交车到达规定站点时,若电量低于一定值,则进行换车,将需要充电的公交车集中充电,采用常规充电方式。根据快速充电过程中电子充电桩提供的实时信息,拟合电动公交车充电过程的曲线为式(15)。

$$P_{\text{公交车快充}}(S_{\text{SOC}}) = 270e^{-0.4458S_{\text{SOC}}} \quad (15)$$

式中: $P_{\text{公交车快充}}$ 为随 SOC 变化的公交车充电功率。

表 2 宇通 ZK6125BEVGQAA 型参数

Table 2 Yutong ZK6125BEVGQAA type parameters

参数	数值
动力电池标称电压/V	575.0
额定容量/(A·h)	144
续航能力/km	83

快充模式的公交车按照班次规定,每次到达站点时开始充电,其充电起始时间是在工作时间区内均匀分布的;常规充电的公交车,电量不足时开始充电,可由公交车路线里程与动力电池容量计算得到起始充电时间。

文中对徐州市市区 189 条线路的公交车起止工作时间与线路长度进行了统计,得到公交车出行率、线路里程分布,如图 4、图 5 所示。图 4 数据表明,徐州市公交车起始发车服从正态分布 $N(6.25, 0.53)$,末班车时间服从正态分布 $N(19.35, 1.26)$ 。

快速充电模式的公交车起始充电负荷可利用线路长度与式(13)进行计算;常规充电模式下,需

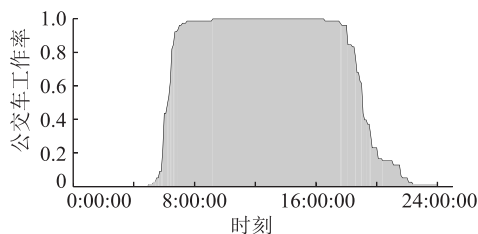


图4 徐州市公交车出行率

Fig.4 Xuzhou bus travel rate

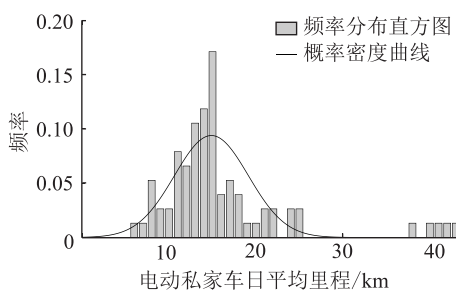


图5 公交车线路里程分布

Fig.5 Mileage distribution of bus routes

要知道公交车司机在电量低于多少时进行换车。通过对 92 条线路的常规充电公交车进行统计,合理假设其起始 SOC 服从 $U[0.2,0.3]$ 分布。

根据上文数据计算得到每辆公交车一天班次为 5.69~8.38 次,假设快充模式的电动公交车每日充电 7 次,充电时长受发车间隔时长限制。徐州市公交车平均发车间隔约为 15 min,之后无论是否充满都立即停止充电;根据电动公交车续航能力、平均工作时间,计算得常规充电模式的电动公交车每日换车 1.94~3.88 次才能满足当天总共行驶的公里数的需求,假设每日充电 3 次。换车充电的公交车不需要立刻投入工作,充电时长无限制,可由式(14)计算。

目前徐州市电动公交车采用快速充电与常规充电的比例约为 1.047:1,常规充电的公交车多数为最早一批投入使用的,有逐渐更改为快充的趋势。参照电动汽车保有量预测模型(1),预测至 2020 年,快速充电与常规充电的比例为 2.448:1。

3.3 出租车

出租车一天中大部分时间都在行驶,常规充电无法满足其运营模式^[19],因此大部分出租车选择快速充电。由于徐州市目前尚未有规模化的电动出租车直流快充充电桩,参考 3.2 节,文中假设出租车充电过程功率为式(16):

$$P_{\text{出租车快充}}(S_{\text{SOC}}) = 180e^{-0.445 \cdot 8S_{\text{SOC}}} \quad (16)$$

参考文献[20],江苏省出租车运营公里数和运营车辆数等统计数据如表 3 所示。比亚迪 QCJ700-

6BEVF 型电动汽车续航能力 320 km,出租车每日充电 2 次即可满足日常运营需求。普通出租车运营模式为一车两人使用,油费按白班夜班分开支付,因此充电时间应分布在换班时,每次允许充至满电。参照徐州市出租车公司管理模式,合理建立模型电动出租车起始充电时间服从正态分布 $N(5.75, 1.47)$ 和 $N(17.75, 1.47)$ 。出租车的平均日运营里程为 357.38 km。假设白班和夜班运营公里数与工作时长成正比,服从 $U(178.69, 200)$ 。

表3 江苏省出租车运营信息

Table 3 Taxi operation information in Jiangsu

参数	数值
运营车数/辆	61 120
运营里程/万 km	777 616
载客里程/万 km	475 760

3.4 公务车

目前数据样本中尚未得到电动公务车的信息,但未来电动公务车将逐渐应用到日常生活中,如政府专用车、洒水车、运钞车等。公务车在没有工作任务的时间段都可充电,参考比亚迪 QCJ7006BEVF 型轿车,常规充电可以满足日常需求。普通公务车在工作时间结束后进入闲置状态,假设其在下班时间到第二天的工作开始时间之间充电,起始充电时间服从正态分布 $N(18.31, 4.01)$ 。根据文献[4]电动公务车 SOC 服从正态分布规律 $N(0.4, 0.12)$ 。由于可以进行充电的时间段很广,因此没有限制。根据计算结果,电动公务车每日必须充一次电才能保证次日的工作正常进行。

4 仿真

4.1 电动汽车保有量预测

文中拟定 GDP、汽车工业生产总产值、原油产量、汽车研发经费、驱动电机型号数量和分散式充电桩数量为比较数列^[5],对其和电动汽车保有量进行无量纲化处理,由式(2)和式(3)计算得各经济因素与电动汽车保有量的灰色关联度,筛选大于 75% 的 GDP 和汽车工业生产总产值作为可完全量化因素输入模型。

将政策因素作为不可完全量化因素,面向汽车行业的从事人员和高校教授共发放 200 份咨询未来电动汽车政策对其发展影响程度的调查问卷,有效收回 183 份,将文中数据进行处理并按照式(4)进行处理后得到 $P\%$ 取 84%。

根据 2015 年《节能与新能源汽车年鉴》^[9] 的全国电动汽车产量,对已知因素、数据进行处理:将政

策因素 f_{u1} 对电动汽车保有量的影响转化为保有量中间值 y_z , 将可完全量化因素 GDP f_{m1} 、汽车工业生产总产值 f_{m2} 和保有量中间值 y_z 进行无量纲化处理, 按各年份得到数据如表 4 所示。

表 4 所选因素无量纲化处理

Table 4 Dimensionless treatment of factors

年份	y 实际值	y_z	y	$f_{u1}/\%$	f_{m1}	f_{m2}
2010	2 138	19.430	1.000	144	1.000	1.000
2011	8 845	81.516	1.369	142	1.269	0.984
2012	22 317	208.613	1.950	140	1.700	0.991
2013	40 438	393.481	3.069	138	2.073	0.981
2014	104 075	1 001.475	4.246	136	2.475	0.959

将 y 和 f_{m1} , f_{m2} 进行拟合得到的自变量、因变量的关系如式 (17) 所示:

$$y = 343.33f_{m1} + 52.77f_{m2} - 398.23 \quad (17)$$

将式 (17) 得到的保有量数值还原, 消除无量纲的影响, 并参考 GDP 的未来趋势对电动汽车保有量的影响, 得到电动汽车保有量实际值如式 (18) 所示。

$$y_{\text{实际值}} = 1\,484.72y_{f_{u1}} \quad (18)$$

将以上公式代入已建好的模型运行程序, 得到电动汽车保有量预测值如图 6 所示, 而 2011—2016 年纯电动汽车年产量如图 7 所示。

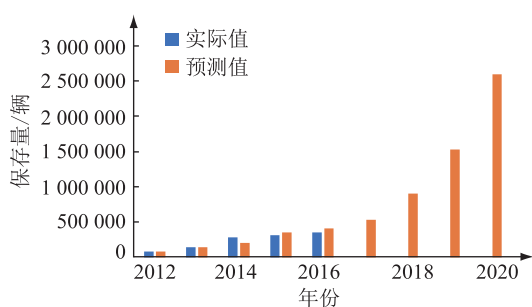


图 6 2020 年全国电动汽车保有量预测值

Fig.6 Forecast value of electric vehicle ownership in 2020

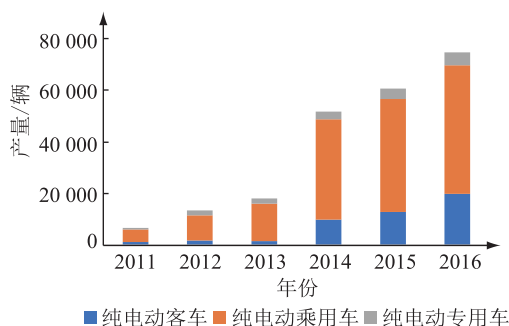


图 7 2011—2016 年全国纯电动汽车年产量

Fig.7 2011—2016 annual production of electric vehicles in China

由此推算出至 2020 年的全国电动汽车年产量为 1 064 611 辆。2017 年《节能与新能源汽车年鉴》数据显示, 2016 年江苏省共推广各类纯电动汽车 14 983 辆, 类型分布如表 5 所示, 推广数量占全国同期纯电动汽车年产量的 19.98%。

表 5 2016 年江苏省各类电动汽车推广数量

Table 5 Promotion of all types of electric vehicles in Jiangsu in 2016

车型	数量	占比/%
大中型客车	6 170	41.18
轻型客车	2 337	15.60
公务车	241	1.61
出租车	1 540	10.28
租赁用车	564	3.77
私人车	2 088	13.94
电力工程车	33	0.22
环卫车	956	6.38
其他专用车	393	2.63
其他	661	4.41

2016 年《江苏交通年鉴》江苏省各市机动车数量的统计数据如表 6 所示, 徐州市机动车汽车数量占江苏省机动车汽车数量的 6.84%。综上预测出 2020 年徐州市电动私家车为 10 596 辆、电动公交车为 2 928 辆、电动出租车为 2 689 辆、电动公务车为 2 484 辆。

表 6 2016 年江苏省各市机动车汽车数量

Table 6 Number of motor vehicles in various cities of Jiangsu Province in 2016

城市	机动车数量	占比/%
南京	1 979 311	15.89
无锡	1 433 766	11.51
徐州	851 541	6.84
常州	968 334	7.78
苏州	2 688 804	21.59
南通	1 162 790	9.34
连云港	405 693	3.26
淮安	393 577	3.16
盐城	633 535	5.09
扬州	556 901	4.47
镇江	426 729	3.43
泰州	538 828	4.33
宿迁	414 128	3.33

4.2 不同区域停车需求预测

根据第 2 节所述, 用徐州市各类建设用地的单位面积停车需求、建筑面积、状态转移矩阵等数据拟合出居民区、工商业区、充电站区的随时间变化的停车需求曲线。图 8、图 9 分别为居民区与工商

业区停车需求日曲线。私家车与出租车可能充电的地点比较广泛,在居民区和工商业区都有可能;公务车充电地点较为固定,多为公司或单位内部,假设公务车全部在工商业区进行充电。

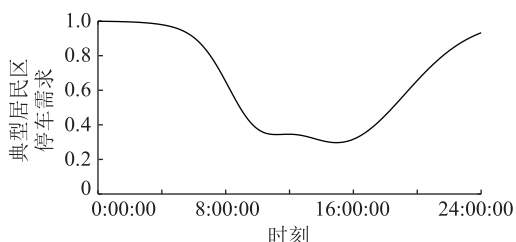


图8 典型居民区停车需求

Fig.8 Parking demand in typical residential areas

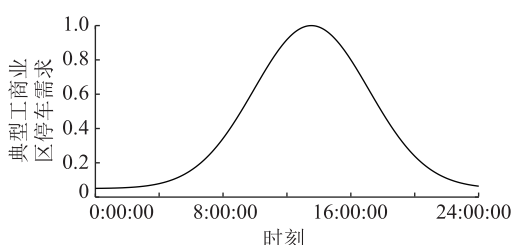


图9 典型工商业区停车需求

Fig.9 Parking demand in typical industrial and commercial areas

公交车充电站区域的停车需求比较特殊,每辆公交车的调度是有固定规律的^[19],根据对徐州市市区各公交车总站的调查,从工作时间开始,公交车站停车率基本不变;至工作时间结束,公交车全部回到终点站,并且电动公交车只在充电站区进行充电。

4.3 用户行为预测

用户行为的分析汇总如表7所示。根据4种车辆的保有量及不同区域的停车需求结果,对每辆车的充电起始时间、充电功率、充电地点等情形进行了模拟,程序执行流程如图10所示。得到各种类的电动汽车充电负荷曲线如图11所示,其中各类电动

汽车充电负荷峰值具体数据如表8所示。各区域充电负荷曲线如图12所示,其中各区域充电负荷峰值具体数据如表9所示。

比较图11中4种车型的充电负荷曲线,私家车与公务车在下班后16:00:00—21:00:00左右迎来负荷高峰。出租车在6:00:00和18:00:00各有一次早高峰与晚高峰。公交车充电负荷集中在公交车运营时间,快速充电所需负荷占比重量较大。公交车充电瞬时功率远大于其他电动汽车,可达 5.6×10^4 kW。从日累计负荷来看,公交车远大于其他电动汽车,出租车较私家车所需充电负荷较多,公务车所需充电负荷最少。

对图12中3种用地类型的负荷曲线进行比较,居民区在6:00:00和19:00:00左右有充电负荷早高峰与晚高峰,工商业区在17:00:00左右迎来负荷高峰,充电站区充电功率在工作时间内持续在3 kW左右,日累计负荷相当可达 4.55×10^5 kW·h,远大于居民区和工商业区。

电动汽车的充电所造成的峰段在16:00:00—19:00:00时段出现,谷段在1:00:00—4:00:00内出现。而配电网的日常负荷的高峰期^[21-24]一般也出现在19:00:00左右,很可能发生“峰上加峰”的现象,必然会影响配电网的稳定运行。配电网负荷峰值过大就需要加强配电网基础设施,投入更多资金进行建设和维修。私家车的充电时间相对自由,可以通过一些措施引导私家车进行有序充电,起到削峰填谷的作用缓解电网压力。由于公交车充电负荷较大,且运营时间固定,无法做有序引导,可以考虑在加入电网位置上进行规划,减小对电网的不良影响。电网接入负载较大时会对整个网络造成电压下降等不良影响,根据潮流可知接入电网末端比接入电源附近带来的负面影响更大。因此建议将大型充电站尽可能建设在发电厂或大型变电所附近。

表7 用户行为数据汇总

Table 7 User behavior data aggregation

项目	私家车		公交车		出租车		公务车
保有量/辆	10 596		2 928		2 689		2 484
充电区域	居民区	工商业区	充电站区		居民区	工商业区	工商业区
充电方式	常规充电		快速充电	换电池充电	快速充电		常规充电
续航里程/km	320		83		320		320
起始充电时间	$N(17.5, 3.47)$		$U(N(6.25, 0.53), N(19.35, 1.26))$		$N(5.75, 1.47), N(17.75, 1.47)$		$N(18, 4)$
充电时长限制/h	无	$L(0.09, 0.63)$	0.25	无	无		无
充电频率	1		6	3	2		1

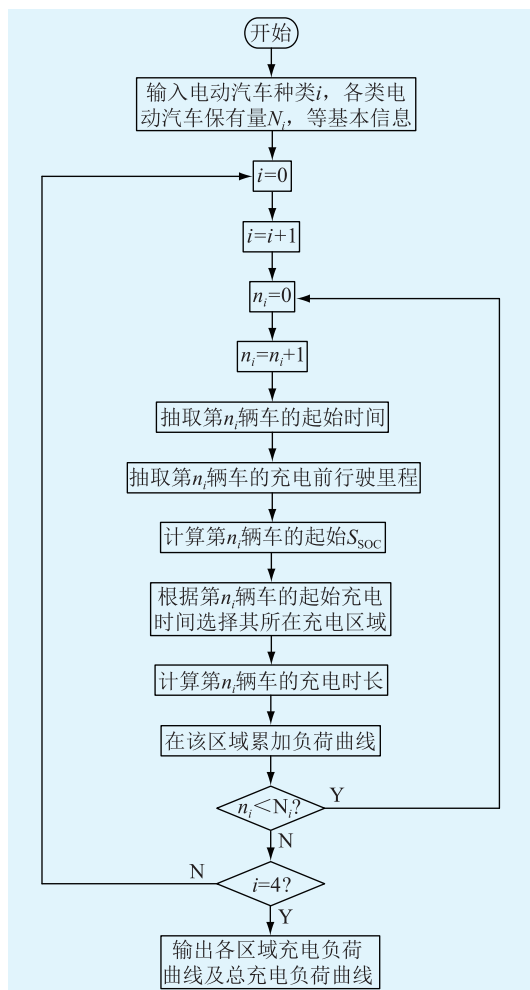


图10 程序执行流程

Fig.10 Flow chart

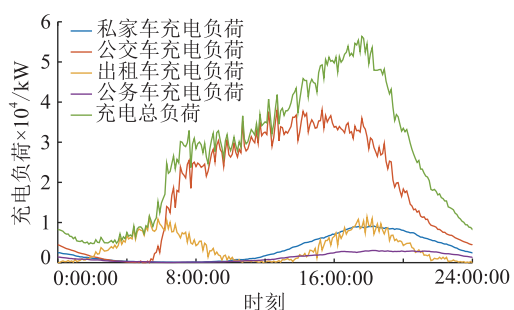


图11 各类电动汽车充电负荷曲线

Fig.11 Charging load curves for various electric vehicles

表8 不同类型电动汽车充电负荷峰值

Table 8 Peak load of different types of electric vehicles

数据	峰值时刻	瞬时功率 $\times 10^4 / \text{kW}$
私家车	17:41:00	0.816
公交车	14:28:00	3.823
出租车	18:03:00	1.010
公务车	18:01:00	0.349
总负荷	18:47:00	5.603

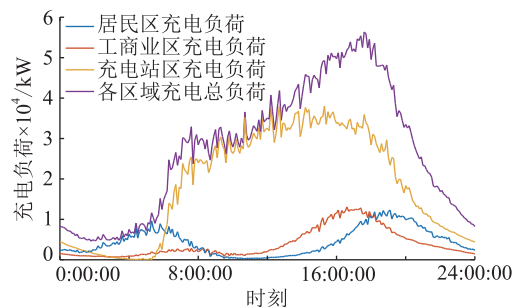


图12 各区域电动汽车充电负荷曲线

Fig.12 Charging load curves of electric vehicles in different regions

表9 不同区域电动汽车充电负荷峰值

Table 9 Peak load of electric vehicles in different regions

区域	峰值时刻	瞬时功率 $\times 10^4 / \text{kW}$
居民区	19:38:00	1.109
工商业区	14:56:00	1.224
充电站区	14:28:00	3.823
总负荷	18:47:00	5.603

5 结论

文中采用最小二乘法预测出电动私家车、电动公交车、电动出租车、电动公务车这4种车型的保有量,结合城市不同用地类型的停车需求和4种车型的用户个性化行为,建立电动汽车充电负荷时空分布的预测模型。以徐州市为算例,预测出不同用地类型区域的电动汽车充电负荷曲线,为充电站规划建设提供理论支撑。通过分析负荷曲线得到以下结论:

(1) 2020年电动汽车充电负荷高峰期很可能与正常生产生活中的用电高峰重合,发生峰值叠加的情况,必然会影响配电网的稳定运行。

(2) 快速充电模式的充电负荷在总负荷中占比较大,公交车日累计充电负荷相当可观,占总负荷的63.71%,在未来的电网建设与规划中需重点关注。

(3) 文中对预测结果进行分析,分别对私家车和公交车充电给出规划建议。该结果对近期徐州市电网建设规划与充电站建设规划有着一定的指导意义。

参考文献:

[1] 艾学勇. 电动汽车充电负荷预测及充换电站协调规划研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2013.

AI Xueyong. Research on charging load forecasting and coordination planning of electric vehicle charging and power plant replacement [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013.

- [2] 田立亭, 史双龙, 贾卓. 电动汽车充电功率需求的统计学建模方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11):126-130.
TIAN Liting, SHI Shuanglong, JIA Zhuo. Statistical modeling method for electric vehicle charging power demand [J]. Grid Technology, 2010, 34(11): 126-130.
- [3] 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1):13-20.
ZHANG Hongcai, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Electric vehicle charging load prediction method considering time and space distribution [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 13-20.
- [4] 罗卓伟, 胡泽春, 宋永华, 等. 电动汽车充电负荷计算方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14):36-42.
LUO Zhuowei, HU Zechun, SONG Yonghua, et al. Calculation method of charging load for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 36-42.
- [5] 童芳, 兰凤崇, 陈吉清. 新能源汽车发展影响因素分析及保有量预测[J]. 科技管理研究, 2016, 36(17):112-116.
TONG Fang, LAN Fengchong, CHEN Jiqing. Influential factors analysis and prediction of new energy vehicle development [J]. Science and Technology Management Research, 2016, 36(17): 112-116.
- [6] IKEYA T, SAWADA N, TAKAGI S, et al. Multi-step constant-current charging method for electric vehicle, valve-regulated, lead/acid batteries during night time for load-levelling [J]. Journal of Power Sources, 1998, 75(1):101-107.
- [7] 肖湘宁, 温剑锋, 陶顺, 等. 电动汽车充电基础设施规划中若干关键问题的研究与建议[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8):1-10.
XIAO Xiangning, WEN Jianfeng, TAO Shun, et al. Research and suggestions on some key problems in electric vehicle charging infrastructure planning [J]. Journal of Electrical Technology, 2014, 29(8): 1-10.
- [8] 张艳娟, 苏小林, 闫晓霞, 等. 基于电动汽车时空特性的充电负荷预测[J]. 电力建设, 2015, 36(7):75-82.
ZHANG Yanjuan, SU Xiaolin, YAN Xiaoxia, et al. Charging load forecasting based on time-space characteristics of electric vehicles [J]. Electric power construction, 2015, 36(7): 75-82.
- [9] 中国汽车技术研究中心. 节能与新能源汽车发展报告(2016)[M]. 北京:人民邮电出版社, 2016.
China Automotive Technology Research Center. Energyconservation and new energy vehicle development report (2016) [M]. Beijing: People's Post and Telecommunications Publishing House, 2016.
- [10] PERUJO A, CIUFFO B. The introduction of electric vehicles in the private fleet: Potential impact on the electric supply system and on the environment. A case study for the Province of Milan, Italy[J]. Energy Policy, 2010, 38(8):4549-4561.
- [11] AXSEN J, KURANI K S. Anticipating plug-in hybrid vehicle energy impacts in California: Constructing consumer-informed recharge profiles [J]. Institute of Transportation Studies Working Paper, 2010, 15(4):212-219.
- [12] HOBBS R, NEWNHAM R, KARNER D, et al. Development of predictive techniques for determination of remaining life for lead acid batteries under fast charge[C]//Battery Conference on Applications and Advances. the Fourteenth. IEEE, 1999: 177-188.
- [13] Department of Transportation. National household travel survey 2017[R]. U.S.:Department of Transportation, 2018:153-157.
- [14] CHO J G, BAEK J W, YOO D W, et al. Reduced conduction loss zero-voltage-transition power factor correction converter with low cost[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 45(3):395-400.
- [15] 罗庆. 电动汽车充电对电网的影响及有序充电研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
LUO Qing. Influence of electric vehicle charging on power grid and orderly charging research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [16] 朱健. 四川电网可靠性评估的蒙特卡洛仿真[D]. 重庆:重庆大学, 2007.
ZHU Jian. Monte Carlo simulation of reliability evaluation of Sichuan power grid [D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [17] VALERIOTE E M, CHANG T G, JOCHIM D M. Fast charging of lead-acid batteries[C]//Battery Conference on Applications and Advances. Proceedings of the Ninth. IEEE, 1994: 33-38.
- [18] 杜娟娟, 裴云庆, 王兆安. 电动车铅酸蓄电池的脉冲快速充电设计[J]. 电源技术应用, 2005(3):28-31.
DU Juanjuan, PEI Yunqing, WANG Zhaoan. Design of pulse fast charging for lead-acid batteries of electric vehicles [J]. Application of Power Supply Technology, 2005(3): 28-31.
- [19] 刘坚. 电动汽车充电方式和商业运营模式初探[J]. 汽车工程师, 2011(1):19-22.
LIU Jian. Electric vehicle charging mode and business operation mode [J]. Automotive Engineer, 2011(1): 19-22.
- [20] 中国报告网. 2017—2022 年中国出租车行业市场发展现状及十三·五投资决策分析报告[R]. 北京:中国报告网, 2017:235-249.
China Reporting Network. 2017—2022 China taxi industry market development status and 13th five-year investment decision analysis report [R]. Beijing: China Reporting Network, 2017:235-249.
- [21] 毕雁冰. 电动汽车充放电对电网影响探析[J]. 时代汽车, 2017(12):21-22.
BI Yanbing. Impact of electric vehicle charging and discharging on Power Grid[J]. Era Automotive, 2017(12): 21-22.
- [22] 王敏, 许建, 潘永春, 等. 电动汽车参与配电侧电力市场竞争价博弈的研究[J]. 广东电力, 2017, 30(2):1-6, 28.
WANG Min, XU Jian, PAN Yongchun, et al. Research on electric vehicles participating in bidding game in distribution side power market [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(2):1-6, 28.

- [23] 张惠生,王帅,赵兴勇,等. 基于负荷区间电价激励的电动汽车充放电调度控制策略[J]. 广东电力,2017,30(3):42-46.

ZHANG Huisheng, WANG Shuai, ZHAO Xingyong, et al. Charging and discharging scheduling control strategy for electric vehicles based on price incentive of load interval[J]. Guangdong Electric Power,2017,30(3):42-46.

- [24] 高峰,谈韵,陶远鹏,等. 电动汽车驱动充电一体化控制策略研究[J]. 电力工程技术,2018,37(2):73-77,113.

GAO Feng, TAN Yun, TAO Yuanpeng, et al. Research on the integrated control strategy of electric vehicle driving and charging[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37

(2): 73-77,113.

作者简介:



李丹奇

李丹奇(1996),女,硕士在读,研究方向为电力系统及其自动化(E-mail:495715426@qq.com);

郑建勇(1966),男,博士,教授,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail:jy_zheng@seu.edu.cn);

史明明(1986),男,博士,高级工程师,从事电能质量工作。

Prediction of time and space distribution of electric vehicle charging load

LI Danqi¹, ZHENG Jianyong¹, SHI Mingming², LI Taoran¹, SHA Haoyuan¹, LIANG Xinyu¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: Based on the least square method and grey relational degree theory, a model for predicting the ownership of electric vehicles is established. The state transition matrix is introduced into the traditional parking demand model to predict the actual parking distribution characteristics of electric vehicles. Based on the Monte Carlo method, this paper aims at electric private cars, electric buses and electric taxis. The charging requirements of electric business vehicles are simulated respectively, and their charging behaviors are simulated respectively. The daily curve of charging load is obtained by simulation. The results show that the peak-valley difference of daily curve of electric vehicle charging load is large, and the demand of electric bus charging load will take up a large proportion.

Keywords: charging load; monte carlo; least square method; grey relational degree; spatiotemporal distribution

(编辑 方晶)