

基于灰色模型的电动汽车充电需求预测研究

在电动汽车快速发展的背景下,开展充电需求预测研究具有重要的参考意义和实用价值。采用灰色预测模型,对区域电动汽车充电需求进行分析。首先,研究了GM(1,1)灰色预测算法流程及准确度校验方法。然后,根据电动汽车充电需求发展现状,建立基于GM(1,1)算法的灰色预测模型。通过在Matlab编程,预测冀北及全国区域电动汽车充电需求。研究表明,基于GM(1,1)的灰色预测模型能够较好地预测电动汽车充电需求发展走势。

周国鹏 傅 军 李雪梅/华北电力科学研究院有限责任公司
于 爽/国网冀北电力有限公司经济技术研究院

0 引言

电动汽车充电需求预测对于分析电动汽车负荷特性,提高接入电网运行可靠性等具有重要意义。在当前电动汽车快速发展背景下,准确预测不同类型用户多场景、多时空尺度的充电需求,可以为充电网络规划、建设和运营提供有效的参考依据。特别针对目前学术领域非常关注的电动汽车与可再生能源发电融合问题,可再生能源本身就具有显著的间歇性和随机性特点,准确预测电动汽车充电需求是实现整个融合系统协调控制的前提条件,对于真正实现电动汽车供电电源清洁、零排放具有重要意义。

电动汽车充电需求受多种因素影响,电动汽车充电负荷的时间、空间分布具有较大的随机性,预测难度较大。目前,相关研究主要针对不同时间、不同类型的电动汽车充电需求进行预测,分类相对较为粗糙。文献[1-3]针对电动汽车充电日负荷需求,从时间角度对其

进行了预测,得到了充电负荷曲线的时间分布特性。文献[4]通过对电动汽车起始充电时刻和日行驶里程概率分布的分析,建立了电动汽车日充电曲线预测模型,比较工作日和非工作日,统一电价和分时电价对电动汽车日充电曲线的影响。文献[5-8]从空间角度出发,结合电动汽车不同区域分布特性,采用聚类分析、模糊算法等手段建立电动汽车充电预测模型,能够从空间分布方面引导电动汽车有序充电。文献[9-11]综合考虑电动汽车充电的时间特性以及空间动态转移特性,利用蒙特卡洛仿真等方法计算充电负荷,进而作出预测。此外,还有基于出行链、系统动力学等理论建立的电动汽车负荷预测模型,也具有一定参考意义^[12-14]。

综合来看,当前针对电动汽车充电需求预测方面的研究还比较粗糙,主要集中在充电负荷预测方面,并且与电动汽车发展的实际情况存在一定偏差。在目前电动汽车快速发展阶段,笔者认为充电量需求预测同等重要,甚至比负荷预测更加重要。电动汽车充电量的多少直接影响充电网络规划、充电设施建设和电网投资改造计划的实施,并且对未来智能用电领域的发展方向具有一定指导意义。因此,本文主要研究电动汽车充电电量需求,针对目前电动汽车可用充电电量数据较少,数据采集系统尚不完善的缺点,考虑采用在处理小样本预测问题方面效果较好的灰色预测理论,对电动汽车充电需求进行预测研究。



周国鹏/助理工程师

关键词/Keywords

灰色模型·

预测·

电动汽车·

充电需求·

走势·

1 灰色预测理论及模型

1.1 灰色预测算法原理

灰色系统理论是邓聚龙教授在1981年提出来的,是一种对含有不确定因素系统进行预测的方法。通过鉴别系统因素之间发展趋势的相异程度,进行关联分析,并通过对原始数据进行生成处理来寻找系统的变化规律,生成较强规律性数据序列,然后建立相应微分方程模型,从而预测事物未来的发展趋势和未来状态。灰色系统理论是研究解决灰色系统分析、建模、预测、决策和控制的理论,灰色预测是对灰色系统所作的预测。该理论的核心就是灰色预测模型(Gray Forecast Model),是通过少量的、不完全的信息,建立数学模型并作出预测的一种预测方法。目前常用的一些预测方法(如回归分析等),需要较大的样本,若样本较小,常造成较大误差,使预测目标失效。灰色预测模型所需建模信息少,运算方便,建模准确度高,在各种预测领域都有着广泛的应用,是处理小样本预测问题的有效工具。

目前使用最广泛的灰色预测模型是关于数列预测的一个变量、一阶微分的模型,即GM(1,1)模型。GM(1,1)模型全称为Gray Model(1,1)模型,(1,1)表示一阶、一个变量的微分方程模型,GM(1,1)是一个线型动态模型,可以用于时间序列的预测。其特点是建立的预测模型所需的原始时间序列数据较少,且在时间上等间距容易采集,方法简便且准确性较高。通过此模型生成的累加数列弱化了原始数列的随机性、波动性,同时增强了序列的平稳性,以一种逐渐递增的形式为建模提供中间数据,然后通过一阶微分方程进行拟合,最终建立预测模型。

GM(1,1)灰色预测模型算法的原理及计算步骤如下。

1) 由原始数据序列计算一次累加序列。

记原始数据序列 $X^{(0)}$ 为非负序列,即

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)\}$$

其中

$$(x^{(0)}(k) \geq 0, k=1, 2, \dots, n)$$

则其相应的一次累加序列为

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(n)\}$$

其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

2) 建立矩阵 B , Y 。

记 $Z^{(1)}$ 为 $X^{(1)}$ 的紧邻均值生成序列,即

$$Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\}$$

其中

$$Z^{(1)}(k) = 0.5x^{(1)}(k) + 0.5x^{(1)}(k-1) \quad (2)$$

则可建立如下矩阵,即

$$Y = \begin{pmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

3) 求逆矩阵 $(B^T B)^{-1}$ 。

4) 根据 $\hat{U} = (B^T B)^{-1} B^T Y$, 求估值 $\hat{a}$ 和 $\hat{u}$ 。

根据模型 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = u$, 其中 a , u 是需要通过建模求解的参数,若 $\hat{U} = (a, u)^T$ 为参数列,则可求解微分方程 $x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b$ 的最小二乘估计系数列,满足

$$\hat{U} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4)$$

5) 用时间响应方程计算拟合值 $\hat{x}^{(1)}(k)$,再用后减运算还原,即

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(1)}(0) - \frac{u}{a})e^{-ak} + \frac{u}{a}, k=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k), k=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

6) 准确度检验与预测。

1.2 灰色预测模型检验

一般而言,灰色系统理论的模型准确度检验方法主要有残差检验、关联度检验和后验差检验三种。

(1) 残差检验

设原始序列为

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$$

相应的模型模拟序列为

$$\hat{X}^{(0)} = \{\hat{x}^{(0)}(1), \hat{x}^{(0)}(2), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)\}$$

则定义残差序列为

$$\begin{aligned}\varepsilon^{(0)} &= \{\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n)\} \\ &= \{x^{(0)}(1) - \hat{x}^{(0)}(1), x^{(0)}(2) - \hat{x}^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n) - \hat{x}^{(0)}(n)\}\end{aligned}\tag{7}$$

相对误差序列为

$$\Delta = \left\{ \left| \frac{\varepsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\varepsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\varepsilon(n)}{x^{(0)}(n)} \right| \right\} = \{\Delta_k\}_1^n \tag{8}$$

对于 $k < n$ ，定义 $\Delta_k = \left| \frac{\varepsilon(k)}{x^{(0)}(k)} \right|$ 为 k 点模拟相对误差， $\Delta_n = \left| \frac{\varepsilon(n)}{x^{(0)}(n)} \right|$ 为滤波相对误差， $\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k$ 为平均模拟相对误差。给定 α ，当 $\bar{\Delta} < \alpha$ ，且 $\Delta_n < \alpha$ 成立时，称模型为残差合格模型。

(2) 关联度检验

设 $X^{(0)}$ 为原始序列， $\hat{X}^{(0)}$ 为相应的模拟误差序列， ε 为 $X^{(0)}$ 与 $\hat{X}^{(0)}$ 的绝对关联度，若对于给定的 $\varepsilon_0 > 0$ ， $\varepsilon > \varepsilon_0$ ，则称模型为关联合格模型。

(3) 后验差检验

设 $X^{(0)}$ 为原始序列， $\hat{X}^{(0)}$ 为相应的模拟误差序列， $\varepsilon^{(0)}$ 为残差序列。分别计算为

$$x^{(0)} \text{ 的均值: } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \tag{9}$$

$$x^{(0)} \text{ 的方差: } s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2 \tag{10}$$

$$\text{残差均值: } \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon(k) \tag{11}$$

$$\text{残差方差: } s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}]^2 \tag{12}$$

定义 $c = c_2/c_1$ 为均方差比值。对于给定的 $c_0 > 0$ ，当 $c < c_0$ 时，称模型为均方差比合格模型。

定义 $p = p(|\varepsilon(k) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745s_1)$ 为小误差概率。对于给定的 $p_0 > 0$ ，当 $p > p_0$ 时，称模型为小误差概率合格模型。

综上所述，预测模型的准确度等级与 $\bar{\Delta}$ 、 ε 、 c 和 p 有关，可以根据表1检验灰色预测模型的准确度。

表1 预测模型准确度等级参照表

准确度等级	$\bar{\Delta}$	ε	c	p
一级	0.01	0.90	0.35	0.95

(续)

精度等级	$\bar{\Delta}$	ε	c	p
二级	0.05	0.80	0.50	0.80
三级	0.10	0.70	0.65	0.70
四级	0.20	0.60	0.80	0.60

2 GM(1,1)用于电动汽车充电需求预测

2.1 电动汽车发展形势及充电需求现状

根据《电动汽车充电基础设施发展指南（2015~2020）》，全国电动汽车保有量到2020年将超过500万辆。其中，电动公务与私人乘用车超过430万辆，电动出租车超过30万辆，电动环卫、物流等专用车超过20万辆，电动公交车超过20万辆。可见，公务与私人乘用车将在未来电动汽车保有量中占据很大比例，达到80%以上。不同类别车型在出行特点、充电方式和能耗量等方面都存在较大差异，现阶段主要车型包括公交车、出租车和环卫物流等专用车，公务与私人乘用车，其行使特性如表2所示。

表2 不同类别车型行使特性

车型类别	年平均行驶里程 /km	百公里平均油耗 /L	百公里平均电耗 /kW·h
公交车	70 000	35	130
出租车	100 000	8	18
物流环卫车	40 000	10	20
私人乘用车	15 000	10	20

就冀北地区而言，当前发展的电动车型主要有公交车、物流环卫专用车以及公务与私人乘用车等类别。根据相关部门统计，截止2015年末电动汽车（包括纯电动和插电混合动力）保有量达到2 500辆左右。其中，公交车1 500辆，私人乘用车850辆，物流环卫等专用车150辆。

根据不完全统计，冀北地区2015年电动汽车最大充电需求达到60万kW·h左右，并全年呈现递增趋势，如图1、图2所示。

2.2 基于GM(1,1)的充电需求预测算法流程

在分析区域电动汽车保有量及充电需求现状的基础上，采用前述章节中介绍的GM(1,1)灰色模

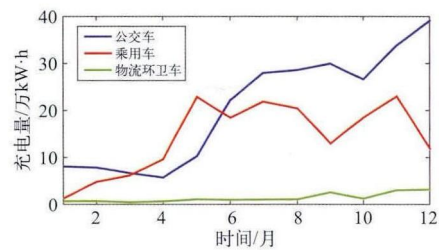


图1 2015年冀北地区各类电动汽车充电量

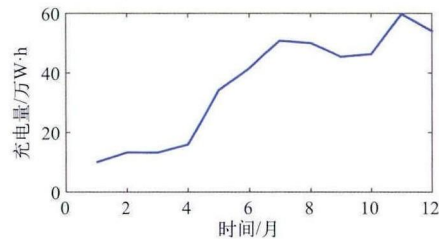


图2 2015年冀北地区电动汽车总充电量

型算法，建立充电需求预测模型，并对冀北地区未来充电量需求进行预测。按照上述GM(1,1)算法步骤，首先导入原始充电量数据，建立原始数据序列；然后按照式(1)~式(4)构造灰色预测模型，计算参数矩阵；根据式(5)、式(6)用时间响应方程计算充电量拟合值，再用后减运算还原得到预测序列；最后检验模型准确度，对模型的预测效果作出定量评价。

基于GM(1,1)的充电需求预测算法流程如图3所示。

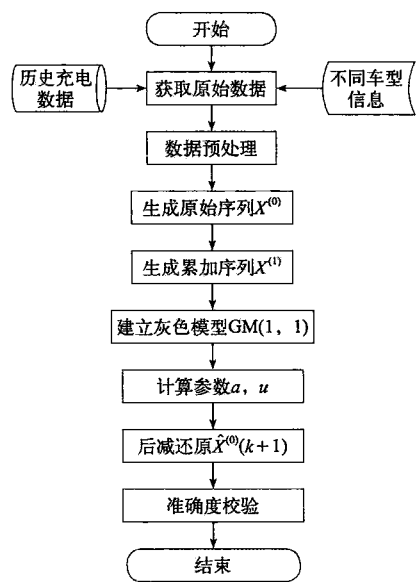


图3 基于GM(1,1)的充电需求预测算法流程

2.3 算例分析

以当前电动汽车充电需求为出发点，采用上述GM(1,1)灰色预测模型分别对冀北地区、全国区域的电动汽车充电需求进行预测。具体实现时，通过在Matlab中编写程序，将GM(1,1)算法写入程序指令，利用Matlab处理矩阵运算的强大能力，实现灰色模型预测计算。

根据工信部最新数据，2015年全年累计生产新能源汽车37.90万辆。分别以2015年各月份的充电量数据为原始数据，利用GM(1,1)算法得到冀北地区、全国区域电动汽车充电需求，计算结果如图4、图5所示。预测准确度参数对比分析如表3所示。

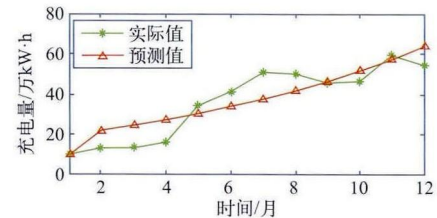


图4 冀北地区充电量预测

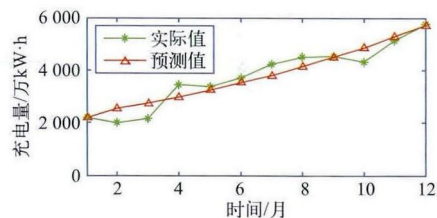


图5 全国区域充电量预测

表3 预测准确度参数对比分析

准确度参数	冀北	全国
误差均值(%)	15.17	9.39
最大误差(%)	71.83	27.80
最小误差(%)	0.01	0.01
误差标准差	0.45	0.31

分析如下：

1) 采用GM(1,1)灰色预测算法能够实现对电动汽车充电需求的预测，从图4、图5可以看出，预测曲线能够反映冀北以及全国电动汽车充电量需求走势。

2) 由于原始充电需求数据是以月为单位，年度数据量时间间隔较大，不同月份存在较大的

偶然性等不可预测的因素,导致原始数据变化较为频繁,而预测数据反映的是充电需求的整体走势,较为平滑且上升趋势性比较明显,这也符合电动汽车市场快速发展的形势。

3)从预测准确度来看,冀北区域误差均值在15%左右,误差标准差为0.45,介于一级与二级准确度之间;全国区域误差均值在9%左右,误差标准差为0.31,预测结果接近一级准确度。这主要是因为全国充电数据涉及区域范围更为广泛,可以有效去除区域效应,而冀北地区的数据只涉及本地区,存在一定的区域特点,也更加难以预测。

4)随着电动汽车市场的不断发展与完善,电动汽车保有量及充电需求将会持续快速增长,可以考虑针对一定区域内的充电预测作日均预测或其他短时预测。

3 结束语

研究了GM(1,1)灰色模型预测算法,并将其应用于电动汽车充电需求预测。针对冀北地区及全国电动汽车充电需求现状,分析不同类型电动汽车充电需求特点,建立了基于GM(1,1)灰色预测算法的预测模型,并对充电需求进行预测。研究表明,基于GM(1,1)的灰色预测模型能够较好地预测电动汽车充电需求发展走势,预测误差保持在允许范围内,具有良好的预测准确度。在电动汽车快速发展的背景下,采用该模型对区域充电需求进行预测分析,可以为充电网络规划、充电设施建设和电网投资建设等提供一定的参考价值。

参考文献

- [1] Ashtari A, Bibeau E, Shahidinejad S, et al. PEV charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (1): 341-350.
- [2] Shahidinejad S, Filizadeh S, Bibeau E. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (1): 135-141.
- [3] 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.
- [4] 艾学勇,顾洁,解大,等.电动汽车日充电曲线预测方法[J].电力系统及其自动化学报,2013(6): 25-30.
- [5] 蒋毅舟.规模化电动汽车用电需求的空分布预测[D].北京:华北电力大学,2012.
- [6] 王晓寅,刘俊勇,唐现刚,等.基于空间负荷预测的电动汽车有序充电方法研究[J].浙江电力,2014(2): 7-13, 21.
- [7] 蒋毅舟.规模化电动汽车用电需求的空分布预测[D].北京:华北电力大学,2012.
- [8] 刘青,戚中译.考虑空间运动特性的规模化电动汽车接入电网负荷预测模型[J].现代电力,2015(1): 76-82.
- [9] 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(1): 13-20.
- [10] 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(7): 75-82.
- [11] 田文奇.基于时空双尺度的电动汽车换电站有序充电调度方法[D].北京:北京交通大学,2013.
- [12] 芦兴,方扬.基于系统动力学模型的我国电动汽车发展规模及充电负荷预测[J].华东电力,2014(11): 2349-2354.
- [13] 陈丽丹,聂涌泉,钟庆.基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J].电工技术学报,2015(4): 216-225.
- [14] 刘晓飞,崔淑梅,谢富鸿,等.基于停车需求模电动汽车VIG放电负荷时空分布预测[J].电气工程学报,2015 10(8): 22-28.

(收稿日期:2016-10-09) EA