

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2017.02.014

城市中长期用电量预测方法研究

徐彬鑫, 李祥飞

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对影响城市中长期用电量的主要因素, 分别建立一元线性回归法、产业产值单耗法、大用户分析法以及气候分析法4种预测模型, 结合算例详细介绍各模型的建立过程以及有效性检验。算例结果表明, 4种预测方法在预测用电量时误差都较小, 可以针对不同的情况采用。

关键词: 电力市场; 用电量预测; 预测模型; 一元线性回归法

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2017)02-0078-06

Research on the Medium and Long-Term Urban Electricity Consumption Prediction Methods

XU Binxin, LI Xiangfei

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the influence of several main factors on urban medium and long-term electricity consumption, four types of forecasting models have been established respectively, namely, linear regression method, industrial output value per unit consumption method, major consumer analysis method, and climate analysis method. The modeling process and validity verification are introduced in detail. The results from numerical example show that the four types of prediction methods established here, applicable for different situations, are able to predict the electricity consumption with small prediction errors.

Keywords: electricity market; electricity consumption forecasting; prediction model; single linear regression method

0 引言

用电量预测是电网规划中的一个重要内容, 对城市中长期用电量进行准确预测关系到一个城市的发展, 关系到供电企业对电力的输送、调度等问题。在电力需求关系不断改变的情况下, 电力负荷特性也出现一些新的变化规律。把握好负荷特性新规律, 考虑影响用电量的相关因素, 对于提高用电量预测精度十分必要^[1]。

从理论上来说, 电力需求的大小和负荷特性的变

化受到国家宏观经济调控和走势、整体经济发展水平、产业调整特点、重点用电行业的发展、地区气候情况等因素的影响。这说明当代绝大多数社会生产活动都将影响电力需求的大小。在对电力需求预测的时候只能在这些影响因素中找出比较重要的因素进行分析和预测。

本文针对4个影响用电需求的主要因素, 分别构建单项数学模型, 对城市中长期用电量进行预测, 以为供电企业掌握市场需求, 为企业决策提供参考依

收稿日期: 2017-01-23

作者简介: 徐彬鑫(1990-), 女, 湖南长沙人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力系统自动化及其应用,

E-mail: 1262649790@qq.com

据。文中的时间跨度为 5~10 a。

1 回归模型预测

回归模型预测就是利用数学中的回归分析方法, 统计出过去用电量数据, 并分析各变量之间的关系, 获得一条确定的曲线, 建立用电量与相关变量间的数学模型。将确定的曲线外延至一定时刻就得到该时刻的预报值, 从而实现预测的目的, 即利用数学模型预测今后的用电量^[2-3]。在用电量预测中, 把影响用电量因素作为自变量, 把用电量作为因变量。因为因变量是随着自变量的变化而变化, 自变量是原因、因变量是结果的关系不能逆转^[4]。建立拟合曲线可以用直线拟合也可以用曲线拟合, 前者统称为线性回归, 后者统称为非线性回归^[5-6]。本文采用反映宏观经济走势的重要指标即国内生产总值 (gross domestic product, GDP) 与城市用电量的关系建立一元线性回归模型, 并结合算例验证该模型是否有效, 从而通过国内生产总值得出未来 5 a 用电量的预测值。课题组选用华中某城市历史数据进行一元线性回归模型的建模和校验。

在一元线性回归模型中, 自变量用 x 表示, 这里将国内生产总值即 GDP 设定为自变量, 因变量是依赖于自变量 x 的随机变量, 用 y 表示, 这里将该城市的用电量设定为因变量。假设自变量 x 与因变量 y 的关系为

$$y = a + bx + \varepsilon, \quad (1)$$

式中: a, b 为与 y 无关的待定系数;

$a + bx$ 为 y 的平均值;

ε 为随机干扰, 在全过程中, 干扰量之和等于零。

假如观测的数据个数为 n , 则 y 在任何 x 值下的估计值 \hat{y} 为

$$\hat{y} = a + bx, \quad (2)$$

则残差为 $(y_i - a - bx_i)$, 而残差平方和 $Q(a, b)$ 为

$$Q(a, b) = \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i)^2. \quad (3)$$

利用高等数学中极值求法, 对 $Q(a, b)$ 求极小值可以得到 a 和 b 的最佳值, 则 \hat{a} 和 \hat{b} 的满足方程

$$\begin{cases} n\hat{a} + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\hat{b} = \sum_{i=1}^n y_i, \\ \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\hat{a} + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)\hat{b} = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \end{cases} \quad (4)$$

式中: \hat{a}, \hat{b} 分别为待求系数 a, b 的估计值;

x_i, y_i 分别为自变量和因变量的观测值。

由式 (4) 可得到唯一解

$$\begin{cases} \hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \\ \hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$;

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

当求出 a 与 b 的估计值 \hat{a} 和 \hat{b} 后, 可得出 y 对 x 的线性回归方程, 即

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x. \quad (6)$$

由华中某城市 2004—2014 年的 GDP 与用电量数据得到其散点图, 确定这两个量之间存在线性关系, 如图 1 所示, 并据此建立 GDP 与用电量的一元线性回归模型。

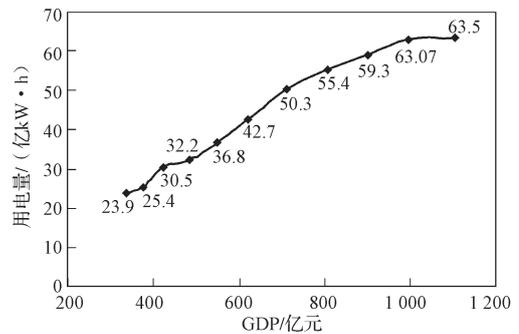


图 1 2004—2014 年 GDP 与用电量关系图

Fig. 1 Relationship schema of GDP and electricity consumption from 2004 to 2014

计算出估计值 \hat{a} 和 \hat{b} , 得到 y 对 x 的线性回归方程, 即

$$\hat{y} = 14.868 + 0.04277x. \quad (7)$$

为了检验所求的一元线性回归方程是否显著, 这里采用相关系数检验。定义变量 y 与变量 x 的相关系数为

$$\hat{r} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (8)$$

可求得华中某城市的 GDP 与用电量间的相关系数 $\hat{r} = 0.9828$, 该数值远大于 0.602 和 0.735, 这说明用上面所得的一元线性回归方程进行预测, 所得到的预测结果比较可靠。

2 产业产值单耗模型预测

单耗法即单位产品电耗法, 它是用电需求预测方

法中的经典方法，主要依靠历史经验来判断变量对用电需求的影响，得到一组接近但不够精确的预测值，其中在中期电力需求预测中不失为一种简单可行的办法^[7]。单耗法要对所有产品划分类别，推算各不同类别的用电量情况，再把全部类别用电量相加得到总的用电量预测值。在具有单耗指标的工业电力预测中，单耗法得到普遍运用^[8]。在进行各个类别单位耗电量指标预测过程中，还要结合当地经济发展状况和目标，分析历史数据中产值指标和单位产值耗电量，并根据产业调整预测出规划期内用电量。这项调查统计工作的工作量十分巨大，在实际操作中很难得到所有指标的单位耗电量的统计值^[9]。所以，有时可以考虑用国民生产总值（GDP）来代替各种产品的产量。

单耗法的计算公式为

$$A = bg, \tag{9}$$

式中： A 为用电量；

b 为产品产量；

g 为产品的单位耗电量。

对一个地区每种用电类别统计出单位耗电量 g_i ，再知道每种类别的产品产量 b_i ，就能计算出 n 种产品的总用电量，为

$$A = \sum_{i=1}^n b_i g_i \tag{10}$$

课题组针对产业结构调整对城市用电需求的影响，运用产业产值单耗模型预测城市 5 a 内的全社会用电量。结合产业结构调整，将全社会用电量分为第一产业用电量、第二产业用电量、第三产业用电量和居民用电量 4 个部分，考虑用每年国民生产总值和人口的增加值代替单位产品的产量。

产业产值单耗法中参照式（10）求各产业用电单耗与各产业增加值的乘积，即能预测规划年限每年各产业用电量。同理可求得居民生活用电量。在预测时，可以用规划年限内的国民生产总值增加值的预测值 \hat{b}_i 代替式（10）中的 b_i ，单位耗电量的预测值 \hat{g}_i 代替式（10）中的 g_i ，则用电量预测值 \hat{A} 为

$$\hat{A} = \sum_{i=1}^n \hat{b}_i \hat{g}_i \tag{11}$$

下面以华中某城市历史数据为例，通过对该城市 2004—2009 年产业单耗及历年全省用电量数据的分析，建立产业产值单耗模型。2004—2009 年各产业单耗如表 1 所示。

表 1 2004—2009 年各产业单耗表

Table 1 Industrial consumption table from 2004 to 2009

年份	GDP/亿元	一产业产值单耗 / (kW·h·万元 ⁻¹)	二产业产值单耗 / (kW·h·万元 ⁻¹)	三产业产值单耗 / (kW·h·万元 ⁻¹)	人均用电量 / (kW·h·万人 ⁻¹)	全社会用电量 / (亿 kW·h)
2004	333.9	224.0	1 478.6	184.3	82.5	23.9
2005	377.2	303.0	1 219.1	252.4	118.6	25.4
2006	422.5	361.9	1 082.7	214.3	162.8	30.5
2007	485.0	118.3	941.5	184.8	248.0	32.2
2008	549.5	95.6	920.2	159.1	297.4	36.8
2009	621.0	160.6	827.0	187.0	340.8	42.7

根据 2004—2009 年的历史数据、该城市国民经济和社会发展的第十二个五年发展规划纲要以及关于“十二五”单位 GDP 能耗的下降指标，对 2010—2014 年期间的产业用电量单耗进行预测。设各产业单耗均速递减，用各产业 GDP 增加值乘以各产业单耗可分别求得一、二、三产业用电量，一、二、三产业用电量相加得全行业用电量。同理，可用人口数乘以人均用电量得到居民生活用电量。最后把历年全行业用电量的预测值与历年居民生活用电量的预测值相加，得到 2010—2014 年全社会用电量的预测值。为了验证产业产值单耗法建立模型的有效性，需要将 2010—2014 年一、二、三产业用电量的预测值、居民生活用电量的预测值、全社会用电量的预测值与一、二、三产业用电量的实际值、居民生活用电量的实际值、全社会用电量的实际值进行比较，如图 2 所示。

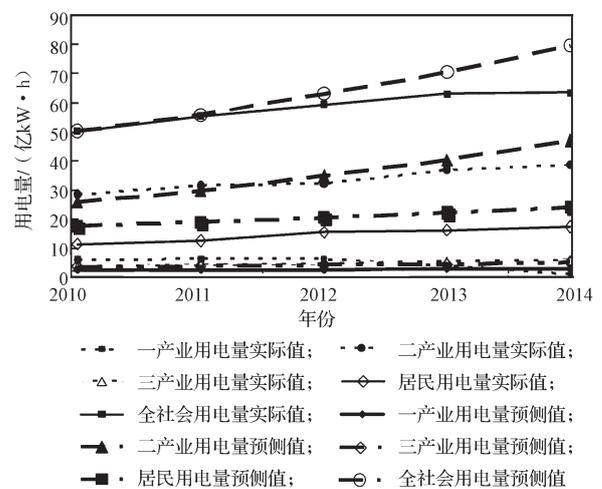


图 2 产业模型用电量实际值和预测值拟合曲线图

Fig. 2 Fitting curves of actual value and predicted value of industrial electricity consumption

由图2可知, 用产业产值单耗模型得到的一产用电量、二产用电量、三产用电量以及居民生活用电量的预测值都与它们各自对应的实际值存在一定误差, 由此相加得到的全社会用电量预测值与实际值相比, 误差进一步扩大。所以产业产值单耗法的预测结果还不够精确。

3 大用户递增模型预测技术

大用户预测方法的主要思路是将该地区大用户(根据实际情况选取)用电剥离, 对大用户用电与其他项目用电分别进行预测。可以把第二产业用户分为已有大用户、新增大用户、一般用户。其中已有大用户可根据历史电量数据以及其未来发展规划确定电量增长速度; 一般大用户可通过营销部门的业扩报装状况确定其投产时间、年用电量等数据进行预测; 一般大用户可采用平均增长率法进行预测得出。

以华中某城市历史数据为例, 建立大用户递增模型并对电量进行预测。首先对大用户进行定义, 根据该城市实际情况, 定义年用电量0.3亿千瓦时以上的用户为大用户; 然后以本地区在建或待建的各重大项目为依据, 从中筛选出投资意向较为明确的大用户, 分年度预测今后大用户电量; 第三, 把历史数据中的第二产业电量分为大用户电量和一般用户电量。第四, 把需要预测的第二产业电量分为已有大用户电量、新增大用户电量和一般用户电量三类。其中, 已有大用户电量参考最近一年大用户电量数据, 一般用户电量根据本地区历史一般用户电量数据得出, 新增大用户电量根据预测大用户电量得出。第五, 预测第一产业用电量、第三产业用电量和居民生活用电量, 可以根据前面所述的各种预测方法得出, 在这里选择采用自然增长率法。最后, 把预测的第一产业用电量、第二产业用电量、第三产业用电量和居民生活用电量相加, 得到全社会用电量的预测数据。2010—2014年大用户预测方法用电量的预测值和实际值比较如图3所示。

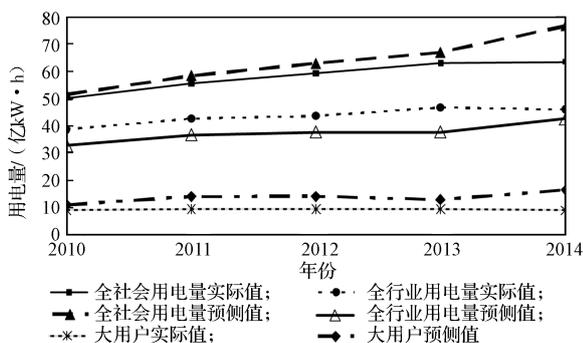


图3 大用户模型用电量实际值和预测值拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curves of actual value and predicted value for major consumers

由图3可知, 利用大用户递增模型得到的大用户用电量预测值与实际值之间的误差较小, 全行业用电量的预测也比较精确。

4 气候模型预测

近年来, 气候条件变化对用电量的影响越来越引起了人们的关注, 随着我国经济的飞速发展, 人民生活水平日益提高, 制冷和取暖设备的用电量在全社会用电量中占有越来越大的比重。气候条件对用电量的影响可以通过温度、降水量、湿度、气压、日照时数等变量作用, 其中, 对全社会用电量影响作用最大的是温度。

用电量受各方面的因素影响, 可以分为对气候敏感的用电量和一般的用电量, 这两个电量需要分开来考虑^[10]。

要研究用电量与气温的关系, 就需要建立气温与用电量的数学模型。以华中某城市为例, 要预测一个中长期的5a用电量, 先要收集该城市近年的气温与用电量的数据。课题组按月为单位, 收集2005—2014年10a每月供电量和每月平均气温的历史数据, 并进行整理。再按照上面的思路进行趋势电量与气象电量的分离, 可知

$$y = y_t + y_w + y_r, \quad (12)$$

式中: y 为供电量;

y_t 为趋势电量;

y_w 为气象电量;

y_r 为随机电量。

这3个量中, 趋势电量 y_t 最有规律可循, 也最容易建模求出, 随机电量 y_r 是一个很小的量, 可以忽略不计, 因此气象电量 y_w 可以由供电量和趋势电量计算得出, 即

$$y_w = y - y_t. \quad (13)$$

趋势电量 y_t 是一个在时间序列中表现平稳变化的量, 它的预测方法根据时间尺度的不同采用不同的方法。在较短的时间尺度内, 如5a期间, 经济可以看作匀速增长, 可以采用最小二乘法建立模型来预测趋势电量。课题组一共收集了10a期间, 120个月的数据, 为了简便, 选用最小二乘法。目标函数是按照时间排列的实际值对趋势的偏差平方和最小^[11], 并要求实际值在趋势线上方的偏差值之和等于实际值在该线下方的偏差值之和, 即偏差总和应等于零。

因此, 实际上就是要求 $\sum (x - \hat{x})^2$ 为最小, 并按此条件来确定趋势直线 $\hat{x} = a + bt$ 的参数 a 和 b 。

使用该城市10a的历史数据, 建立趋势电量的

方程, 即

$$\hat{y}_t = a + bt, \quad (14)$$

式中 t 为时序。

本研究中一共是 120 个月的数据, 时间序列为偶数, 时间序列原点在两个中间时间之间, 左中心点之前各时刻序号为 $-1, -3, -5, \dots$, 右中心点之后各时刻序号为 $1, 3, 5, \dots$, 则 $\sum t = 0$, 于是参数 a 和 b 的表达式为

$$a = \frac{\sum x}{N} = \bar{x}, \quad (15)$$

$$b = \frac{\sum tx}{\sum t^2}, \quad (16)$$

式 (15)~(16) 中: N 为月数, 取 120;

x 为观测指标;

\bar{x} 为观测指标的平均值。

最后计算得出 $a=324.8274$, $b=139.4006$, 再代入式 (14), 可以得出每月的趋势电量 y_t , 再由式 (13) 可以得到每月的气象电量 y_w , 从而实现了趋势电量的分离, 并且趋势电量 y_t 是稳定增长的, 但是该气象电量 y_w 受供电量 y 波动的影响, 有正负值。为了增强客观性, 引入月相对气象用电量 $P^{[12]}$, 定义为

$$P = \frac{y_w}{y} \times 100\%。 \quad (17)$$

引入月相对气象用电量后, 气象电量就是一个客观的比值。可以看出, 月平均气温关系与月气象用电量 y_w 或月相对气象用电量 P 之间的相关性有明显的季节性变化^[12], 所以需要分春、夏、秋、冬 4 个季节来进行拟合。用 MATLAB 进行二次拟合, 分季节建立月相对气象用电量 P 对于月平均气温 x 的数学模型。

春季 (3—5 月) 拟合方程为

$$P = 0.0012x^2 - 0.0557x + 0.5222; \quad (18)$$

夏季 (6—8 月) 拟合方程为

$$P = 0.0004x^2 + 0.0325x - 1.1216; \quad (19)$$

秋季 (9—11 月) 拟合方程为

$$P = 0.0008x^2 - 0.0306x + 0.1746; \quad (20)$$

冬季 (12—2 月) 拟合方程为

$$P = -0.0053x^2 + 0.0353x + 0.0296。 \quad (21)$$

由拟合方程式 (18)~(21), 预测 2005—2014 年四季的月相对气象用电量 P' 。再将月相对气象预测电量 P' 代入式 (17) 的变式

$$y'_w = \frac{P' y_t}{1 - P'}, \quad (22)$$

计算出月气象用电量预测值 y'_w , 最后将预测的

月气象用电量预测值 y'_w 代入式 (13) 的变式

$$y' = y'_w + y_t, \quad (23)$$

得到供电量的预测值 y' 。最后要求得到的是全社会用电量。根据定义, 全社会用电量等于供电量与厂用电量之和。全社会用电量预测值与实际值的比较拟合曲线如图 4 所示。

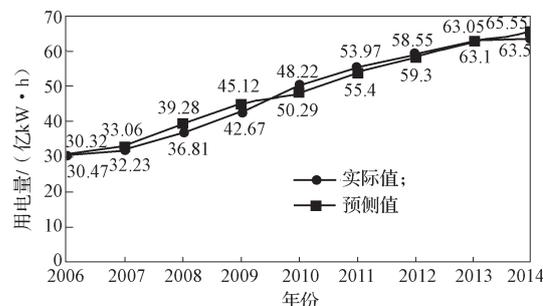


图 4 气候模型全社会用电量预测值与实际值拟合曲线图

Fig. 4 Fitting curve of forecast value and actual value of climatic model

由图 4 可知, 气候预测模型以温度变化为变化因素, 在假设温度是平均变化的基础上, 通过 MATLAB 建立的拟合方程对用电量的预测能达到很小的误差, 在上述的 4 种方法中, 气候模型的预测效果最佳。

5 结语

以华中某城市用电量数据为研究基础, 针对用电量的影响因素建立了 4 种不同的城市中长期用电量单项预测模型。其中, 一元线性回归模型的预测平均绝对误差为 2.172 023, 均方根误差为 2.662 502, 标准误差为 2.943 507; 产业产值单耗模型的预测平均绝对误差为 5.498 400, 均方根误差为 8.056 618, 标准误差为 10.401 050; 大用户递增模型预测的平均绝对误差为 4.960 100, 均方根误差为 6.500 149, 标准误差为 8.391 657; 气候与用电量模型的预测平均绝对误差为 1.361 111, 均方根误差为 1.630 000, 标准误差为 1.848 246。这 4 种单项模型建模方法比较简单, 能在一定程度上对未来电量进行预测。在电力市场改革的大环境下, 城市用电量的准确预测能为供电企业掌握电力市场提供依据, 使其准确把握用电市场趋势, 为供电企业的发展做出正确的决策提供参考。

参考文献:

- [1] 吴海波. 基于负荷特性分析的中长期负荷预测研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
WU Haibo. Research on Medium-Long Term Load

- Forecasting Based on Load Characteristic Analysis[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [2] 胡朝阳, 孙维真, 汪震, 等. 考虑市场力的短、中、长期电价预测[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 16-22.
HU Chaoyang, SUN Weizhen, WANG Zhen, et al. Short-Term, Medium-Term and Long-Term Forecasting of Electricity Price with Consideration to Market Power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 16-22.
- [3] KHUNTIA S R, RUEDA J L, MARTA M M, et al. Forecasting the Load of Electrical Power Systems in Mid-and Long-Term Horizons: a Review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(16): 3971-3977.
- [4] 孟庆天, 李莉美. 城市电力负荷预测方法分析[J]. 科技创新与应用, 2012(34): 158.
MENG Qingtian, LI Limei. Urban Power Load Forecasting Method Analysis[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2012(34): 158.
- [5] 李金超, 牛东晓, 李金颖, 等. 基于熵权的中长期电力负荷组合预测[J]. 华东电力, 2005, 33(8): 26-29.
LI Jinchao, NIU Dongxiao, LI Jinying, et al. Combination Forecasting of Medium-Long Term Power Load Based on Entropy Weigh[J]. East China Electric Power, 2005, 33(8): 26-29.
- [6] DUDEK G. Pattern-Based Local Linear Regression Models for Short-Term Load Forecasting[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 130: 139-147.
- [7] 祁振华. 电力负荷预测的方法研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2012(23): 86-87.
QI Zhenhua. Power Load Forecasting Methods of Research[J]. Inner Mongolia Science and Technology and Economy, 2012(23): 86-87.
- [8] 叶剑. 电力负荷预测方法在配网规划中的实施要点分析[J]. 通讯世界, 2014(24): 75-76.
YE Jian. Power Load Forecasting Methods in the Implementation of Quantitative Analysis in the Planning of Distribution Network[J]. Communication World, 2014(24): 75-76.
- [9] 白莉妍, 史玉琴. 基于产业产值单耗法的邢台电网负荷预测研究[J]. 中国高新技术企业, 2015(33): 8-9.
BAI Liyan, SHI Yuqin. Based on the Industry Output Value of Unit Consumption Method of Xintai Power Grid Load Forecasting Research[J]. China Hi-Tech Enterprise, 2015(33): 8-9.
- [10] 陈颖嘉. 气温变化对城市用电量的影响研究: 以广州为例[D]. 广州: 华南师范大学, 2010.
CHEN Yingjia. Impact of Temperature Change on Urban Electricity Consumption: The Case of Guangzhou[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2010.
- [11] 祝滨, 张艳杰, 刘耀年, 等. 地区电网调度短期负荷预测系统[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 37-39.
ZHU Bin, ZHANG Yanjie, LIU Yaonian, et al. Short-Term Load Forecasting System of District Power Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 37-39.
- [12] 孙晓, 曾浩宇, 梁维, 等. 城市电网负荷特性分析方法研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(3): 43-48.
SUN Xiao, ZENG Haoyu, LIANG Wei, et al. On an Analytical Approach to Load Characteristics of Urban Power Grids[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(3): 43-48.

(责任编辑: 申剑)