

DOI: 10.7667/PSPC171112

## 动态相似与静态相似相结合的短期负荷预测方法

方二零<sup>1</sup>, 李龙<sup>1</sup>, 赵家铸<sup>1</sup>, 王坚<sup>2</sup>, 赵习猛<sup>1</sup>, 黎灿兵<sup>1</sup>, 李奇远<sup>1</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 武汉供电设计院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 气温对负荷的影响存在累积效应, 这导致气象条件与日类型相同两天的负荷仍然可能有较大的差异。因此, 现有的以当天气象条件和日类型为特征参量的相似日选取方法不能保证预测的准确率。针对目前累积效应带来的影响, 提出了一种动态相似的思路, 并且将其与现有的静态相似方法相结合得到一种新的短期负荷预测方法。运用解耦模型分别对待预测日的日平均负荷和负荷曲线形状进行预测。采用动态相似的思路进行日平均负荷预测, 采用静态相似日的思路进行负荷曲线形状的预测。算例中, 分别以对节假日的负荷预测以及连续高温日期的负荷预测为例, 通过对北京某地区的实例计算, 结果表明, 该预测方法可以提高短期负荷预测的准确率。

**关键词:** 短期负荷预测; 累积效应; 相似日; 解耦模型; 标么曲线

### Short-term load forecasting based on the combination of dynamic similarity and static similarity

FANG Baling<sup>1</sup>, LI Long<sup>1</sup>, ZHAO Jiazhu<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, ZHAO Ximeng<sup>1</sup>, LI Canbing<sup>1</sup>, LI Qiyuan<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Wuhan Power Supply Design Institute, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The influence of temperature on the load has a cumulative effect, which leads to a big difference on the load even the weather conditions and the day type of the two days are the same. The current similarity data selection methods which take weather conditions and the day type as the characteristic parameters cannot guarantee the accuracy of prediction. Thereby, a dynamic similar method is proposed, and a new short-term load forecasting method is proposed by combining it with the existing methods. The daily average load and the load curve of candidate prediction day are forecasted respectively by using decoupling model. The daily average load is predicted by the dynamic similar method and the static similar method is used for the load curve prediction. In the case study, the first day of holiday and the day of continuous high temperature are taken for the load forecast as an example. Through instance simulation and calculation of a district in Beijing, it is shown that the proposed method can improve the accuracy of the holiday load forecast.

This work is supported by State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University) (No. LAPS16003).

**Key words:** short-term load forecasting; cumulative effect; similar day; decoupling model; per-unit curve

## 0 引言

短期负荷预测主要是对未来几天内的负荷进行预测, 用于安排日调度计划和设备检修等<sup>[1-3]</sup>。短期负荷预测在电力调度中发挥重要作用, 其预测准确率对电力系统经济性和可靠性等具有重要影响<sup>[4-7]</sup>。

短期负荷预测可以采用相似日选取, 并根据相似日负荷预测待预测日的负荷<sup>[8-9]</sup>。目前, 已经很

多文献对短期负荷预测进行了相关研究。文献[10]提出了一种采用负荷以及负荷增量来计算预测日与历史日之间的距离, 从而来确定相似日选取的方法, 并且将权重引入到计算过程中。文献[11]对各种因素的影响规律进行了深入的研究, 并且提出了一种具有自适应能力、能自动识别主导因素的相似日选取方法。文献[12]提出基于动态权值优化的相似日选取算法和灰色 GRNN 串联组合模型的短期负荷预测, 采用动态权值法相似日选取算法, 增强了相似日选取算法的适应性和有效性。文献[13]提出了一种基于分段多目标的相似日选取算法。该方法很

基金项目: 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学) 开放课题项目资助(LAPS16003)

好地克服了选择的相似日只有部分相似的困难，并且提出了虚拟相似日的概念。文献[14]为解决短期电力负荷预测中预测准确率差、计算时间长等问题，提出一种基于自组织特征映射网络进行特征提取相似日的极限学习机短期电力负荷预测方法。文献[15]针对短期负荷预测中节假日的特殊性，提出基于相似日负荷修正的算法。现有的相似日选取方法可以归纳为静态相似的方法，即以当天气象条件和日类型为特征参量的相似日选取方法。

考虑到负荷中包含负荷规模信息和负荷波动信息，文献[16]提出解耦的预测方法，将短期负荷预测分为标幺曲线预测和负荷水平预测两部分。负荷水平(一般为日平均负荷)反映负荷规模信息；标幺曲线，即该天每个时段的负荷除以当天日平均负荷得到的一个无量纲序列，反映了一天內负荷曲线的形状。由于负荷水平和标幺曲线受相关因素影响的规律不同，解耦预测方法有利于更好地掌握负荷变化规律，使短期负荷预测更加精细化。

文献[17-18]提出了考虑累积效应的短期预测负荷研究方法。所谓累积效应，即待预测日的日平均负荷，在前几日连续高温或者连续低温的影响下，会出现不寻常的增长现象，使得各种因素相似的两天的负荷并不一定相似。例如，夏日常连续多日出现高温天气，此时的电力空调负荷会逐步攀升；在经过连续高温天气后，即使温度开始下降，负荷受温度影响的变化也并不明显，这是因为前几日高温天气产生的累积效应的结果。

由于日平均负荷和标幺曲线的预测受不同因素的影响，气温对负荷变化的影响中，累积效应发挥着重大影响。本文提出一种动态相似与静态相似相结合的短期负荷预测方法，充分考虑累积效应对日平均负荷预测的影响，采用动态相似的思路预测待预测日的日平均负荷，并且采用静态相似的思路预测待预测日的标幺曲线。结合日平均负荷与标幺曲线，得出负荷预测结果，通过算例验证，可有效提高负荷预测准确率。

## 1 动态相似序列取方法及应用

### 1.1 动态相似序列含义

每天的最高气温对日平均负荷的影响中存在累积效应，且影响程度较高。图 1 是华中某地区 2010 年 7 月份日最高温度和日最大负荷的变化曲线。

从图 1 可以看到，两者的变化趋势整体相似，当温度升高时，负荷一般也会随之增大。7 月 16 日至 18 日持续高温，虽然 18 日温度有所降低，但是负荷还是增长的趋势，这就是累积效应导致的。由

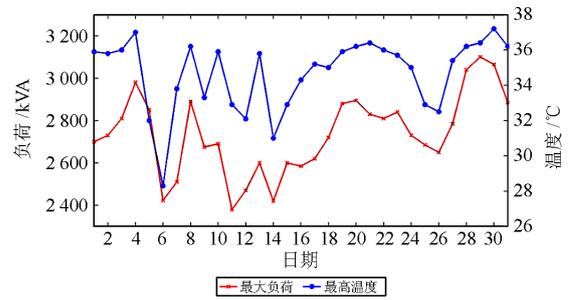


图 1 某地区 7 月份最大负荷和最高温度变化图

Fig. 1 The highest load and maximum temperature change curve of a place in July

于存在累积效应，所以某一天的负荷不仅受当天气象因素的影响，还受之前若干天气象因素的影响，即使气象因素完全相同的两天它们的负荷也可能会有较大差别。所以原来静态相似的思路不再适用于高温季节的负荷预测。本文提出动态相似序列的思路，预测日平均负荷。动态相似序列的含义是待预测日及其之前的若干天气象条件以及日类型的变化过程同历史上某一段时间的变化过程相似，即寻找一段变化过程相似的序列；认为日平均负荷在相似的历史序列中呈现的变化规律，与含待预测日的序列相同。简而言之，原来静态相似的思路认为，日类型、气象因素相似的日期，负荷相似；动态相似的思路认为，日类型、气象因素变化过程相似的序列，对应的日平均负荷变化过程也会相似。

如图 2 所示，要预测某地区 7 月 29、30、31 日的负荷，其前面几天的气温分别为 34 °C、36 °C、37 °C，如果在历史上能找到同样的三天气温变化过程接近 34 °C、36 °C、37 °C，而历史上这段日期的负荷变化过程是已知的，假设这种变化规律延续到含待预测日的序列，根据这种变化过程可以预测出待预测日的平均负荷。

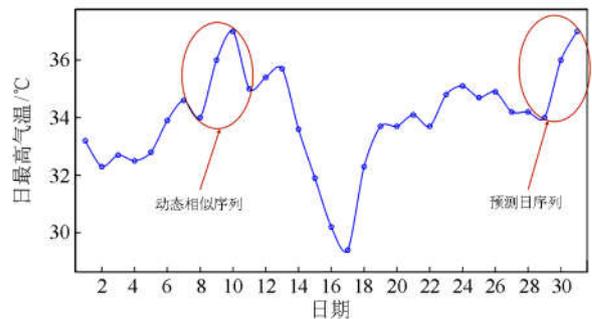


图 2 动态相似序列示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic similarity sequence

### 1.2 动态相似序列选取方法

在运用动态相似的方法进行预测时，关键点在

于如何确定动态相似序列。动态相似是指待预测日加上其之前若干天负荷预测影响因素的变化过程, 与选取的相似日与其之前若干天的负荷预测影响因素的变化过程相似。先把每日的各种指标数据归一化, 选取待预测日和其之前若干天与历史上某天和其之前若干天, 可以构成下面两个时间子序列:

$$P_1 = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_k\} \quad (1)$$

$$P_2 = \{Y_0, Y_1, Y_2, \dots, Y_k\} \quad (2)$$

将其按时间序列排序,  $X_0$  是所选取的历史上某天的负荷预测影响因素的合集,  $X_i$  为该日之前第  $i$  天的负荷预测影响因素的合集,  $Y_0$  是待预测日的负荷预测影响因素的预测值的合集,  $Y_i$  为待预测日之前的第  $i$  天的负荷预测影响因素的合集。其中  $X_i = (x_i(1), x_i(2), x_i(3), \dots, x_i(n))$  为  $n$  维空间上的变量;  $n$  为考虑的影响因素的数目, 例如温度、湿度、风速等等;  $x_i(j)$  为归一化后的第  $j$  个影响因素值。则第  $j$  个影响因素的动态相似程度为

$$d_j = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^k (x_i(j) - y_i(j))^2}}{\sqrt{k}} \quad (3)$$

$$t_j = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=0}^{k-1} \left( \frac{x_i(j) - x_{i+1}(j)}{x_{i+1}(j)} - \frac{y_i(j) - y_{i+1}(j)}{y_{i+1}(j)} \right)^2}}{\sqrt{k}} \quad (4)$$

其中, 式(3)表明第  $j$  个影响因素在数值大小上的相似程度, 式(4)表明第  $j$  个影响因素在变化过程中的相似程度。

$n$  个影响因素共同作用下的总体相似程度为

$$S = \text{sig} \prod_{j=1}^n d_j^{\alpha_j} t_j^{\beta_j} \quad (5)$$

式中:  $\text{sig}$  代表日类型, 待预测日与选定日相同为 1, 不同为 0;  $\alpha_j$  为第  $j$  个影响因素的在数值大小上对负荷预测影响的权重;  $\beta_j$  为第  $j$  个影响因素的在变化过程中对负荷预测影响的权重, 该值可由该因素对预测的相关性得出。

根据式(5), 可以求得历史上的任意一天与待预测日的动态相似程度, 数值越大, 代表越相似。由此可选取动态相似序列。

### 1.3 动态相似序列的应用

选取动态相似序列之后, 进行日平均负荷的预测。按相似度排序, 选取  $E$  个最相似的动态相似序列, 其对应的时间子序列为  $P_1-P_E$ , 其中第  $a$  个时间子序列代表选取的时间序列日期为  $\{d_\alpha(0), d_\alpha(1),$

$d_\alpha(2), \dots, d_\alpha(k)\}$  天, 其中括号内数据越小代表为越新的日期, 若待预测日与今日的差距为  $i$  天, 则认为待预测日与今天的负荷量的增长率与与  $d_\alpha(i)$  日的增长率相同。则由第  $a$  个选取的动态相似序列得到的待预测日的日平均负荷为

$$F_\alpha = \frac{L_{d_\alpha(0)}}{L_{d_\alpha(i)}} \cdot L_{d_0} \quad (6)$$

式中:  $L_{d_\alpha(0)}$  是  $d_\alpha(0)$  日的日平均负荷;  $L_{d_\alpha(i)}$  是  $d_\alpha(i)$  日的日平均负荷;  $L_{d_0}$  是今日平均负荷。

综合  $E$  个相似度序列, 得到待预测日的日平均负荷为

$$F = \beta \sum_{\alpha=1}^E F_\alpha (1 - \beta)^{\alpha-1} \quad (7)$$

式中,  $\beta$  为平滑系数, 一般取值在 0.20~0.50。

## 2 静态相似日选取方法及应用

### 2.1 静态相似日选取方法

现有的短期负荷预测方法, 在选取相似日时基本是静态相似日。静态相似日如图 3 所示。用不同颜色表示受不同影响因素(气象、日类型等)作用的历史负荷, 从历史负荷中选取静态相似日, 意味着选取若干个气象、日类型等各种因素均比较相似的日期, 并认为它们的负荷与待预测日负荷接近, 组成一组历史负荷用于对未来相似日进行预测。

气温对日平均负荷的影响存在明显的累积效应, 但对每天标么曲线的影响相对而言小得多。因此, 标么曲线的预测不需要采用动态相似的思路, 可沿用现有的静态相似的思路, 综合考虑日类型、气象因素, 选取外部因素相似的若干日, 取其标么曲线的加权平均, 作为待预测日的标么曲线。在节假日等特殊日期, 标么曲线的相似日选取中, 还需采用近年历年同期<sup>[14]</sup>。

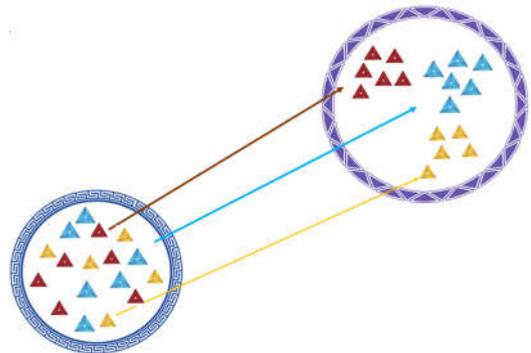


图 3 静态相似日示意图

Fig. 3 Schematic diagram of static similar day

## 2.2 静态相似日方法的应用

按照上一节选取相似日之后，建立标幺曲线预测模型为

$$P_{AV,a} = \frac{1}{m} \sum_{b=1}^m P_{b,a} \quad (8)$$

$$H = \beta \sum_{a=1}^D \left[ \frac{P_a}{P_{AV,a}} (1-\beta)^{a-1} \right] \quad (9)$$

式中： $H$  为待预测日的标幺曲线； $m$  为每天时段个数； $D$  为历史日中挑选的相似日的个数； $P_{b,a}$  为第  $a$  个历史日第  $b$  个时段的负荷有效值； $P_a$  为第  $a$  个历史日的负荷曲线； $P_{AV,a}$  为第  $a$  个历史日的负荷的平均值； $\beta$  为平滑系数，一般取值在 0.20~0.50。

标幺曲线预测的基本流程如下：

1) 根据上一节从历史日中挑选出的相似日排序，按相似度由高到低排列。

2) 根据式(8)计算各历史日的日平均负荷，将各历史日负荷曲线标幺化。

3) 根据待预测日与历史日在时间因子和气象因子之间的关系，确定平滑系数，并确定挑选的历史日的标幺曲线在待预测日标幺曲线中所占权重，其中历史日距离待预测日近的其权重系数大，距离越远则其权重系数小些。

4) 综合考虑以上因素，根据公式(9)，确定待预测日的标幺曲线。

## 3 动、静态相似组合应用

本文参考文献[19]中的预测方法，将短期负荷预测分为曲线形状预测和日平均负荷预测两部分。其中，曲线形状预测采用标幺曲线预测，即静态相似的预测方法；日平均负荷采用动态相似的预测方法。在节假日以及连续高温日期时，解耦预测方法的优势尤为明显。节假日的负荷曲线形状，与去年同期负荷曲线形状的相似度高，如图 4 所示，连续三年 10 月 1 日的负荷标幺曲线十分相似；日平均负

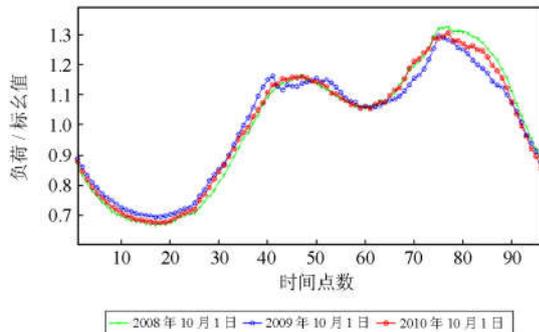


图 4 多年 10 月 1 日负荷标幺曲线

Fig. 4 Load unitary curve of the past years on October 1

荷，则表现为一种动态相似，即节假日日平均负荷相对之前正常日的变化比例，与去年同期的变化比例是相似的。

如在夏季，连续高温将导致电力负荷快速攀升。表 1 是我国北方某市 2008 年 7 月的部分数据。

表 1 我国北方某市 2008 年 7 月日最高气温与日平均负荷数据

Table 1 The highest temperature and daily average load data of July 2008 in northern China

日期	日最高气温/℃	日平均负荷/MW
20080701	29	2 979.838
20080702	29	3 155.871
20080703	37	3 517.035
20080704	34	3 678.683
20080705	26	2 983.101
20080706	35	3 121.341
20080707	32	3 585.597

从表 1 可以看到，7 月 3 日到 7 月 4 日，最高气温从 37℃ 下降到 34℃；34℃ 仍然属于高温；由于前一日的高温，以及当天的高温，在累积效应的作用下，虽然 7 月 4 日的气温有所下降，但负荷反而有明显上升。

如果采用静态相似日的方法进行预测，以气温作为选取相似日的方法。由于 7 月 4 日的气温相比前一日低，那么负荷预测结果很有可能相比 7 月 3 日的负荷还要低。因此，如果不考虑累积效应，采用基于静态相似日选取的预测方法进行预测，可能会导致负荷预测结果误差扩大。

根据 1、2 节结论，日平均负荷采用动态相似的思路进行预测；标幺曲线采用静态相似的思路进行预测；再将两个预测结果综合，按下式获得待预测日的预测负荷为

$$P = H \times F \quad (10)$$

动态相似与静态相似相结合的思路，对提高高温季节和节假日短期负荷预测准确率有较大作用。高温季节中，气温对负荷的影响中存在累积效应，静态相似日期的日平均负荷与待预测日的日平均负荷并不一定相似。采用动态相似思路预测日平均负荷，可较好地体现累积效应的影响。对于节假日，日类型相同的日期已经是去年同期，时间上相距较远，日平均负荷可能已经发生较大变化，近期无日类型相似的日期，因此静态相似的思路可能选不出日平均负荷接近的相似日。采用动态相似的思路，节假日的日平均负荷与之前若干个工作日的日平均负荷的变化规律，与去年同期该变化规律相似。

## 4 算例分析

本文以节假日第一天和连续高温情况下的负荷预测为例, 说明本文所提方法的适应性。

### 4.1 节假日第一天负荷预测

根据北京某地区 2008~2011 年的负荷数据来对模型检验, 预测 2011 年国家法定节假日(春节、端午节、五一劳动节、国庆节等)的负荷。相似日的选取模型中  $A_1$  和  $A_2$  取值为 0.95; 基于解耦的负荷预测模型中, 标幺曲线模型中  $\beta$  取值为 0.31, 日平均负荷预测模型中  $\alpha$  的取值为 0.33。本文对北京某地区 2011 年五一劳动节节假日第一天进行预测。

标幺曲线的相似日选取结果如表 2 所示。

表 2 五一节假日第一天负荷预测标幺曲线相似日的选取

Table 2 Selection of similar day of per-unit curve for load forecasting on the first day of May Day Holiday

待预测日	相似日
2011 年 5 月 1 日	2010 年 5 月 1 日
	2009 年 5 月 1 日
	2008 年 5 月 1 日

日平均负荷采用动态相似的选取方法如表 3 所示。由表 3 可知: 日平均负荷相似日的选取采用动态相似的方法, 即节假日第一天, 相对之前一天的变化幅度, 与历史同期相似。

表 3 五一节假日第一天负荷预测日平均负荷相似日的选取

Table 3 Selection of similar day of average load for load forecasting on the first day of May Day Holiday

含待预测日序列	动态相似序列
2011 年 4 月 28 日~ 2011 年 5 月 1 日	(2010 年 4 月 28 日 ~ 2010 年 5 月 1 日)
	(2009 年 4 月 28 日 ~ 2009 年 5 月 1 日)
	(2008 年 4 月 28 日 ~ 2008 年 5 月 1 日)

基于以上分析结果, 得到五一节假日第一天的负荷预测结果如图 5 所示。图中蓝色曲线代表待预测日的历史曲线, 红色曲线和绿色曲线代表本文提出的方法和静态相似的方法分别对节假日第一天

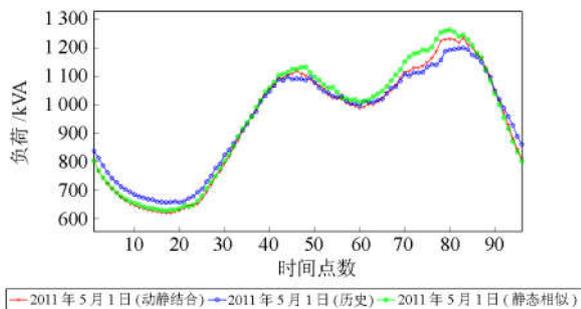


图 5 五一节假日第一天的负荷预测

Fig. 5 Load forecasting on the first day of May Day Holiday

待预测日的预测曲线。由图可知, 两种方法在负荷较低的时候预测准确率相差不大。但是, 随着负荷不断增大, 本文提出的动态相似和静态相似结合的方法预测的准确率要高于静态相似的预测方法。经计算可得, 本文提出的动态相似和静态相似结合的方法预测的日平均准确率为 97.4%, 静态相似的预测方法的日平均准确率为 96.7%。

### 4.2 连续高温负荷预测

本节对该地区 2011 年暑假一段连续高温日期, 即 2011 年 8 月 10 日~2011 年 8 月 14 日的最后一天的负荷进行预测。其中, 标幺曲线的预测同上一节的方法类似, 这里不进行详细的说明。

日平均负荷的预测, 采用的是 1.2 节提出的动态相似的选取方法, 通过分析历史日的温度、湿度、降雨量、风向等指标, 得出的相似日选取结果如表 4 所示。

表 4 连续高温负荷预测日平均负荷相似日的选取

Table 4 Selection of similar day of average load for load forecasting on the day of continuous high temperature

含待预测日序列	动态相似序列
2011 年 8 月 10 日~ 2011 年 8 月 14 日	(2011 年 7 月 10 日 ~ 2011 年 7 月 14 日)
	(2011 年 6 月 18 日 ~ 2011 年 6 月 22 日)
	(2010 年 8 月 13 日 ~ 2010 年 8 月 17 日)
	(2009 年 6 月 25 日 ~ 2009 年 6 月 29 日)

基于以上分析结果, 得到该段连续高温日期最后一天的负荷预测结果如图 6 所示。图中蓝色曲线代表待预测日的历史曲线, 红色曲线和绿色曲线代表本文提出的方法和静态相似的方法分别对连续高温待预测日的预测曲线。由图 6 可知, 本文提出的动态相似和静态相似结合的方法预测的准确率要高于静态相似的预测方法。经计算可得, 本文提出的动态相似和静态相似结合的方法预测的日平均准确率为 98.6%, 静态相似的预测方法的日平均准确率为 96.9%。

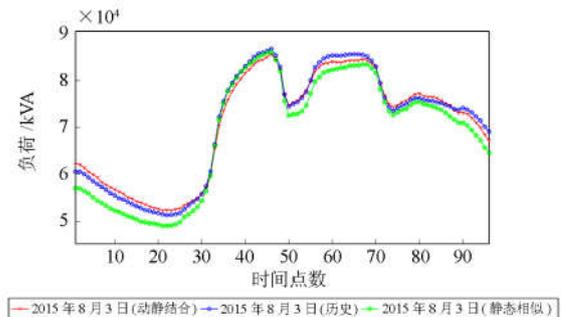


图 6 连续高温负荷预测

Fig. 6 Load forecasting on the day of continuous high temperature

### 4.3 预测误差验证

本文采用文献[20]的方法，定义负荷预测的误差分为最大绝对相对误差和平均绝对相对误差，从而可以全面地反映负荷的预测准确率的高低。

本文对预测五一节假日第一天以及连续高温时两种情况下负荷预测的结果的最大绝对误差和平均绝对相对误差进行计算，如图 7 所示。其中图 7(a)是节假日的误差，图 7(b)是连续高温日期的误差；蓝色代表本文提出的方法的负荷预测误差，红色为静态相似的方法的负荷预测误差。

通过计算其平均相对误差可以得出，节假日的负荷预测中，动态相似与静态相似结合的平均相对误差为 2.560 3%，静态相似的模型的平均相对误差为 3.278 1%，误差减少 0.717 8%。连续高温的负荷预测中，动态相似与静态相似结合的平均相对误差为 1.424 6%，静态相似的模型的平均相对误差为 3.096 0%，误差减少 1.671 4%。

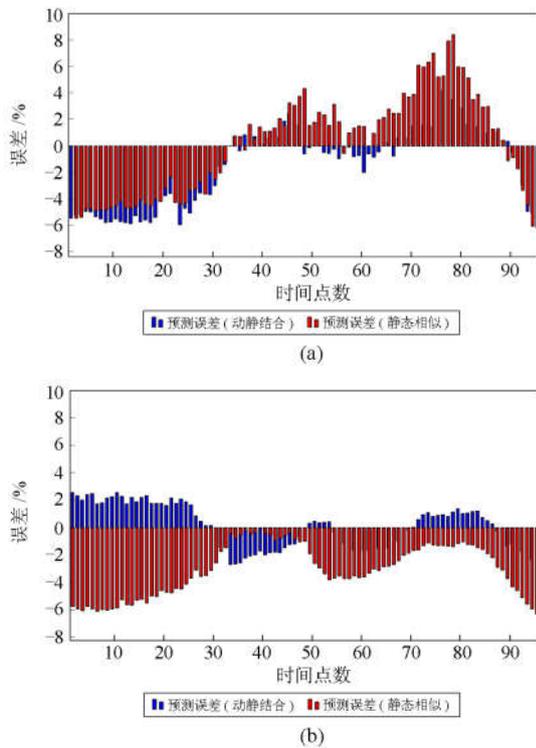


图 7 两种方法的误差对比  
Fig. 7 Error comparison between two methods

### 5 结语

本文提出了一种动态相似与静态相似相结合的短期负荷预测方法。将短期负荷预测分成日平均负荷与标么曲线预测。日平均负荷受累积效应等因素影响，采用动态相似的思路进行预测。再利用静

态相似的思路对标么曲线进行预测。最后将两者结合，得出最终的短期负荷预测结果。该方法分别较为准确描述了日平均负荷和标么曲线受相关因素影响的规律，尤其适应于节假日和高温季节的短期负荷预测。

通过对北京某地区的节假日及连续高温天气的负荷预测表明，运用该预测方法可以有效提高短期负荷预测的准确率。

### 参考文献

[1] KWANG H K, HYOUNG S Y, YONG C K. Short-term load forecasting for special days in anomalous load conditions using neural network sand fuzzy inference method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 559-565.

[2] 康重庆, 夏清, 张伯明, 等. 电力系统负荷预测研究综述与发展方向的探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(17): 1-11.  
KANG Chongqing, XIA Qing, ZHANG Boming, et al. Review of power system load forecasting and its development[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(17): 1-11.

[3] 廖旋焕, 胡智宏, 马莹莹, 等. 电力系统短期负荷预测方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(1): 147-152.  
LIAO Nihuan, HU Zhihong, MA Yingying, et al. Review of short-term load forecasting method of electric power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(1): 147-152.

[4] ABU-EL-MAGD M A, SINHA N K. Short-term load demand modeling and forecasting: a review[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1982, 12(3): 370-382.

[5] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 1-13.  
ZHAO Jiaxing, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 1-13.

[6] 杨家然, 王兴成, 蒋程, 等. 计及风力发电风险的电力系统多目标动态优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 25-31.  
YANG Jiaran, WANG Xingcheng, JIANG Cheng, et al. Multi-objective dynamic optimal scheduling of power system considering wind power risk[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 25-31.

[7] 姚富强, 张余, 柳永祥. 电磁频谱安全与控制[J]. 控制与指挥学报, 2015, 1(3): 278-283.

- YAO Fuqiang, ZHANG Yu, LIU Yongxian. Security and control for electromagnetic spectrum[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(3): 278-283.
- [8] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 9-16. DOI: 10.1186/s41601-016-0016-y.
- [9] 马哲, 舒勤. 基于ESPRIT分解算法的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 90-96.  
MA Zhe, SHU Qin. Short term load forecasting based on ESPRIT integrated algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 90-96.
- [10] 蔡佳宏, 刘俊勇. 超短期负荷预测中相似日的选择方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 38-41.  
CAI Jiahong, LIU Junyong. Selecting method for similar day in super short-term load forecasting[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science), 2006, 33(1): 38-41.
- [11] 黎灿兵, 李晓辉, 赵瑞, 等. 电力短期负荷预测相似日选取算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 69-73.  
LI Canbing, LI Xiaohui, ZHAO Rui, et al. A novel algorithm of selecting similar days for short-term power load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 69-73.
- [12] 李啸骢, 李春涛, 从兰美, 等. 基于动态权值相似日选取算法的短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 1-8.  
LI Xiaocong, LI Chuntao, CONG Lanmei, et al. Short-term load forecasting based on dynamic weight similar day selection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 1-8.
- [13] 王剑锋, 向铁元, 徐富祥, 等. 基于分段多目标相似日选取法的短期负荷预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(3): 435-440.  
WANG Jianfeng, XIANG Tiejuan, XU Fuxiang, et al. Short-term load forecasting based on piecewise similar selecting method with multiobjective[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(3): 435-440.
- [14] 马立新, 尹晶晶, 郑晓栋. 基于特征提取相似日的ELM短期负荷预测研究[J]. 电子科技, 2015, 28(12): 22-25.  
MA Lixin, YIN Jingjing, ZHENG Xiaodong. Short-term load forecasting based on daily feature extraction of similar days and ELM[J]. Electronic Sci & Tech, 2015, 28(12): 22-25.
- [15] 林辉, 刘晶, 郝志峰, 等. 基于相似日负荷修正的节假日短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 47-51.  
LIN Hui, LIU Jing, HAO Zhifeng, et al. Short-term load forecasting for holidays based on the similar days' load modification[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 47-51.
- [16] 黎灿兵, 刘梅, 单业才, 等. 基于解耦机制的小地区短期负荷预测方法[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 87-92.  
LI Canbing, LIU Mei, SHAN Yecai, et al. Short-term load forecasting method of small region based on decoupling mechanism[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 87-92.
- [17] 肖伟, 罗滇生, 董雪. 积温效应分析及日最大负荷预测中的应用[J]. 微计算机信息, 2009, 25(1): 262-264.  
XIAO Wei, LUO Diansheng, DONG Xue. Analysis of accumulated temperature effect and application in forecasting[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(1): 262-264.
- [18] 黎灿兵, 杨朋, 刘玮, 等. 短期负荷预测中考虑夏季气温累积效应的方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 96-99.  
LI Canbing, YANG Peng, LIU Wei, et al. An analysis of accumulative effect of temperature in short-term load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 96-99.
- [19] 牛东晓, 王建军, 李莉, 等. 基于粗糙集和决策树的自适应神经网络短期负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 30-34.  
NIU Dongxiao, WANG Jianjun, LI Li, et al. Short-term load forecasting use adaptive ANN based on rough set and decision tree[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 30-34.
- [20] 陈衡, 王科, 陈丽华, 等. 基于滤波算法的节假日短期负荷预测研究[J]. 电气技术, 2014(9): 12-15.  
CHEN Heng, WANG Ke, CHEN Lihua, et al. Research on short-term holiday load forecasting based on filter algorithms[J]. Electrical Engineering, 2014(9): 12-15.

收稿日期: 2017-07-25; 修回日期: 2017-11-09

作者简介:

方八零(1980—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统优化调度; E-mail: 5911866@qq.com

李龙(1983—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统优化调度; E-mail: lilong1688@163.com

黎灿兵(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统综合节能、电网分析与控制。E-mail: licanbing@qq.com

(编辑 张爱琴)