

最大用电负荷与经济变量的关联研究

朱平芳 谢婳青 刘盼盼

摘要 用电负荷的估计与预测是经济社会稳定发展的重要因素。以用电负荷数据为导向,发现在高温天气当降温用电设备处于满负荷运行的状态下,用电负荷基本上由经济因素所决定,从而分离经济和气温两个对电力需求影响的因素,提出一种对不可观测最大基准用电负荷的估计方法以准确预测最大用电负荷。运用特征指数方法构建最大基准用电负荷指数,探索其与经济变量之间的关系。以上海为例构建年度和季度的最大基准用电负荷指数,发现其与经济发展高度拟合,反映近年来上海在产业结构调整方面卓有成效。本文以数据为导向,挖掘数据的充分信息,从新的视角估计最大基准用电负荷,以其为桥梁达到准确预测最大用电负荷的目标,为经济形势与转型的预判提供有效分析和数据支持。

关键词 最大用电负荷 基准气温 特征指数

作者朱平芳,上海社会科学院数量经济研究中心研究员(上海 200020);谢婳青,上海社会科学院数量经济研究中心、上海社会科学院经济研究所助理研究员(上海 200020);刘盼盼,国网上海市电力公司经济技术研究院经济师(上海 200120)。

中图分类号 F06

文献标识码 A

文章编号 0439-8041(2020)02-0044-14

一、问题提出与文献述评

十八大以来,中国经济逐渐从高速增长转向高质量发展阶段,推动经济发展质量变革、效率变革、动力变革的抓手便是生产方式、产业结构的不断调整和优化升级,电力消费是产业结构调整客观数据,也是衡量经济高质量发展阶段性的重要指标,可以说,电力指标是经济发展的晴雨表。用电负荷,即电力负荷(Electrical Load),是用电设备在某一时刻从电力系统取用所消耗的电功率总和,依据用户使用电能的目的不同,可分为城乡居民生活负荷、商业负荷、工业负荷、农业负荷等^①。随着经济社会的发展,基础设施建设的完善,用电设备的数量和种类逐渐增加,用电负荷也相应提升,因此,用电负荷的数据客观上反映了经济社会的发展情况^②。最大用电负荷是指用电负荷的最大值,不仅受到气温的影响,还受经济社会发展的影响。通过分解出经济因素对最大用电负荷的影响,能为经济形势的分析提供客观数据的支持。

但是,用电负荷是复杂的数据,不仅反映经济运行状况,还包括气温、人口等对电力需求的影响;此外,用电负荷是滞后的数据,电力部门需要利用历史数据来准确地预测短期、甚至是中长期用电负荷,尤

① Glisson, Tildon H., 2011, *Introduction to Circuit Analysis and Design*, Springer; Karady, George G., Holbert, Keith E., *Electrical Energy Conversion and Transport: An Interactive Computer-Based Approach*, IEEE Press, Second Edition, 2013.

② Roller, Lars-Hendrik, Waverman, L., "Telecommunications Infrastructure and Economic Development: A Simultaneous Approach," *American Economic Review*, 2001, 91 (4), pp. 909-923; Yoo, Seung-Hoon, "Electricity consumption and economic growth: evidence from Korea," *Energy Policy*, 2005, 33 (12), pp. 1627-1632.

其是最大用电负荷,才能保证满足城市化进程中居民生活和生产的电力需求、减少过度电能的浪费和损耗^①。因此,最大用电负荷的预测是影响整个电网安全稳定运行的基础,是电力系统调度的关键。尤其面对千万人口的超大城市,如何预测最大用电负荷便成为关乎人们正常生活和城市稳定和谐的重要问题。

用电负荷的预测按时间分类,可以分为长期预测、中期预测和短期预测,一般而言,长期预测是指一年至十年,中期预测是指一月、季度或半年,短期预测是指一天或一周^②。用电负荷的估计主要分为传统的统计回归方法和数据挖掘的方法,传统的统计回归方法包括线性回归^③、时间序列^④等;数据挖掘的方法包括支持向量机^⑤、人工神经网络^⑥等。Amjady 提出用人工神经网络和 Box-Jenkins 方法预测峰值负荷^⑦。

自 2014 年 11 月国务院对城市规模划分标准调整以来,常住人口超过 1000 万的超大城市充分体现了中国改革开放四十年来城市化进程的成果。目前,中国已经有以北上广为代表的十个超大城市。随着经济进入新常态,传统产业不断优化升级,加快发展先进制造业,超大城市的经济社会业态也逐渐发生转变,这种转变如何通过经济变量来体现和解读,本文提供了新的视角。以上海为例,2018 年三产增加值 22842.96 亿元,同比增长 8.7%,占生产总值的比重是 69.9%,占比逐年增加,战略新兴产业和制造业的层级逐步提升以及新的商业模式与服务业态的不断形成,对城市化特性所彰显的用电负荷趋势产生了重要影响。

在研究电力需求的文献中,都提到人口增长是决定电力需求的重要因素^⑧,较高的人口增长率会增加电力消费^⑨。随着中国长期以来的快速工业化和城市化进程,电力需求也呈现指数型增长^⑩。但是,就超大城市来说,2018 年上海市常住人口达 2423.78 万人,同比增长 0.02%,近三年的人口增长率都低于 1%,由于超大城市的人口规模已接近其承载力的极限边缘,人口基本处于饱和状态,人口增长趋于平缓,人口增长率非常低,因此,对电力需求的增加也较为平缓,在本文中假定其并非重要因素。

用电负荷的估计与预测是电力调度的重要参考依据,是经济社会稳定发展的重要因素;用电负荷数据的客观性为我们解读经济发展和转型分析提供了新的视角。但是,用电负荷数据的复杂性使得学术界和电力部门一直难以对其准确估计和预测,其中的主要困难来源于用电负荷受到经济因素和气温因素的双重影响,且不可观测。在高温天气当降温用电设备处于满负荷运行的状态下,用电负荷基本上由经济因素所决定。因此,本文尝试在高温条件下选择合适的温度(称之为基准温度),达到估计不可观测的最大基准用电负荷及其与经济变量的关联性,提供较为有效的预测分析经济与电力互动方法的主要目标;由于大量数据分析认为两者的差别仅由温差引起,将最大基准用电负荷及其指数作为桥梁,能达到准确估计和预测最大用电负荷的目标。

因此,本文不同于以往针对用电负荷估计方法的讨论,以用电负荷数据为导向,挖掘数据中的充分信

① Soliman, S.A., Al-Kandari, A. M., *Electrical Load Forecasting: Modeling and Model Construction*, Elsevier, 2010.

② Al-Hamadi, H. M., Soliman, S.A., "Long-term/mid-term electric load forecasting based on short-term correlation and annual growth," *Electric Power Systems Research*, 2005, 74 (3), pp. 353-361.

③ Papalexopoulos, A.D., Hesterberg, T.C., "A regression-based approach to short-term system load forecasting," *IEEE Transactions on Power Systems*, 1990, 5 (4), pp. 1535-1547.

④ Huang, S-J., Shih, K-R., "Short-term load forecasting via ARMA model identification including non-Gaussian process considerations," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18 (2), pp. 673-679.

⑤ Chen, B-J., Chang, M-W., Lin, C-J., "Load forecasting using support vector Machines: a study on EUNITE competition 2001," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19 (4), pp. 1821-1830.

⑥ Park, D.C., El-Sharkawi, M.A., Marks, R.J., Atlas, L.E. and Damborg, M.J., "Electric load forecasting using an artificial neural network," *IEEE Transactions on Power Systems*, 1991, 6 (2), pp. 442-449.

⑦ Amjady, N., "Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2001, 16 (4), pp. 798 - 805.

⑧ 何晓萍、刘希颖、林艳苹:《中国城市化进程中的电力需求预测》,《经济研究》2009 年第 1 期。

⑨ 林伯强:《结构变化、效率改进与能源需求预测——以中国电力行业为例》,《经济研究》2003 年第 5 期;林伯强、刘畅:《收入 and 城市化对城镇居民家电消费的影响》,《经济研究》2016 年第 10 期。

⑩ 史丹、冯永晟:《中国电力需求的动态局部调整模型分析——基于电力需求特殊性的视角》,《中国工业经济》2015 年第 10 期。

息,考察城市的经济和气温两个因素对电力需求的影响机制,提出一种对不可观测最大基准用电负荷(V_r)的估计方法以准确预测最大用电负荷(V_m),用特征指数(Hedonic)方法建立最大基准用电负荷指数,为经济形势与转型的预判提供有效分析方法和数据支持。

二、经济与气温因素对用电负荷影响的内在机制

本文假定超大城市的电力需求主要由经济与气温两个因素影响。自改革开放以来,上海市电力消费随着 GDP 的增长而增长,2018 年的电力消费达 1566.66 亿千瓦时,同比增长 2.61%,用电负荷也随之正向变化,2018 年的上海电网整点最高负荷达 3094 万千瓦,同比下降 5.33%;而气温因素有两个方向,当气温升高(如夏季),用电负荷与气温的变化是同向的,当气温降低(如冬季),用电负荷与气温的变化是反向的。在实际社会中,因生活、生产等用电的复杂性使得主要宏观经济变量与气温对用电负荷的作用也呈现复杂的非线性特征,是经济和气温的多值函数。由于对用电负荷影响的作用机制不明晰,经济与气温各自对用电负荷的作用互相融合、相互干扰,使得对最大用电负荷的数据分析带来了实质性的困难。

首先,我们分析经济和气温因素对电力变量的函数关系:

$$Y = F(E, T) \quad (1)$$

其中, Y 是可观测的电力变量,如负荷、电量等; E 是宏观经济变量,如 GDP、二产或三产的产出、工业增加值等; T 是气温; F 是未知的函数关系。由统计数据 and 实际经验易得出, Y 与 E 同向变化,而 T 在夏季时与 Y 同向, T 在冬季时与 Y 反向,从而构成与经济与气温的非线性关系。

用电负荷可以分为非空调用电负荷与空调用电负荷,定义为“基础用电负荷”和“降温(取暖)用电负荷”,基础用电负荷与经济发展程度有关,经济越发达,工业、服务业所需电量越大,在一定阶段,基础用电负荷是趋于稳定的;降温(取暖)用电负荷与温度有关,夏季温度越高(冬季温度越低),空调需要开启来达到降温(取暖)的功效;但是随着经济的发展,基础设施建设不断完善,空调装机数量的增加,降温(取暖)用电负荷也会随之增加。我们将这种关系简化为数学表达式,记 Y_i 是时点 i 的用电负荷值, X_i 是时点 i 的基础用电负荷值, Z_i 是时点 i 的降温(取暖)用电负荷值($i=1, 2, 3, \dots, n$)。所以,某一时点的用电负荷值包含基础用电负荷和降温(取暖)用电负荷两部分:

$$Y_i = X_i + Z_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

假定春季和秋季气温凉爽,不使用空调(取暖设备),则用电负荷不包含降温(取暖)用电负荷,故可用春季和秋季的用电负荷平均值来替代 X_i ,从而我们能估算该年的基础用电负荷和降温(取暖)用电负荷。

我们以日最大用电负荷为分析对象,可知日最大用电负荷的关系如下:

$$\max Y_i = \max(X_i + Z_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

以上海为例,包括第四部分的实证分析,本文所采用的用电数据是来自上海市电力公司的每天在二十四个时点上的用电负荷数据,时间段是 2000 年 3 月 1 日—2017 年 8 月 15 日,共 6377 天,其中包括横表 24 时点负荷(共 149040 个时点负荷值,非闰年每年有 8760 个数据)、日最大负荷、日最小负荷、日电量和一、二、三产及居民生活用电的月度数据;温度数据是来自上海市电力公司的日最高温度、日最低温度数据;经济变量的数据是来自上海市统计局 2001—2018 年统计年鉴的 GDP 数据,一、二、三产季度数据和人口数据等。其中,本文的四季划分如下:冬季是 12 月 11 日—2 月,春季是 3 月—5 月,夏季是 6 月—9 月,秋季是 10 月—12 月 10 日,故全样本共七十季,即 2000 年第一季度—2017 年第二季度。

图 1 是上海市十八年的四季日最大用电负荷图,从图中我们可以看到,每个夏季或冬季的日最大用电负荷在季初和季末与春季或秋季的日最大用电负荷基本呈平行关系,这意味着 Y_i 和 X_i 的峰值之间是近似平行的关系;随着时间的推移,日最大用电负荷同比呈增长的趋势。从以上数据结构我们总结两个实际用电的规律:(1)在一定时段内,基础用电负荷峰值序列存在一种固定的结构(图 1 中春季和秋季的序列);(2)在特定时间段和一定气温范围内,降温(取暖)用电负荷值变化不大。

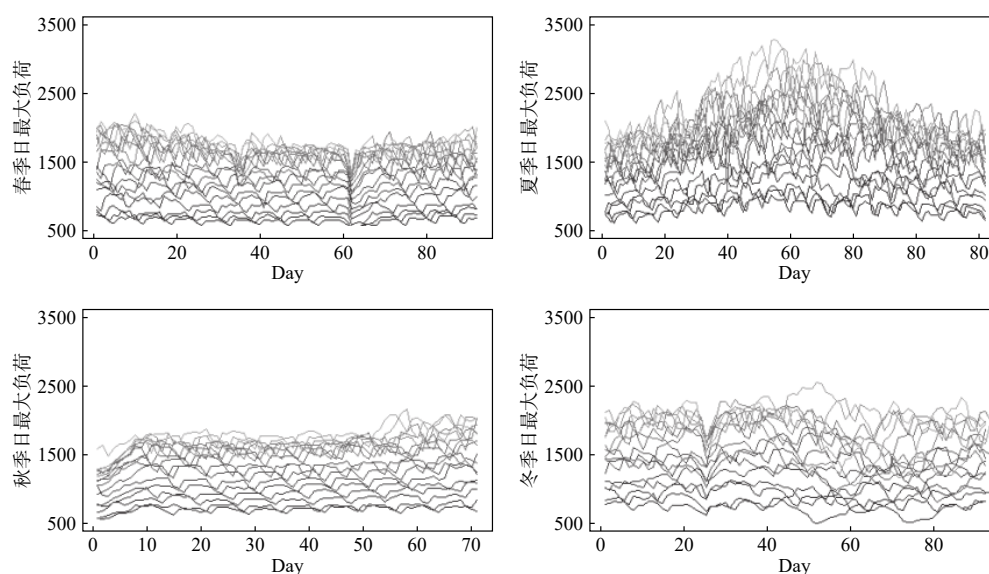


图 1 四季日最大用电负荷图

数据来源：上海市电力公司日最大用电负荷数据。注：每条实线表示 2000—2017 年的不同年份四季日最大用电负荷序列，由于年份较多，故不标记，随着年份的增加，颜色越淡。

图 2 是选取近三年的四季日最大用电负荷图，从图中我们可以看到，每季的日最大用电负荷数据具有明显的季节性特征结构，春季和秋季的日最大用电负荷基本处于平稳的态势，进一步说明将春季和秋季的用电负荷作为该年基础用电负荷估计降温（取暖）用电负荷是可行和合理的。

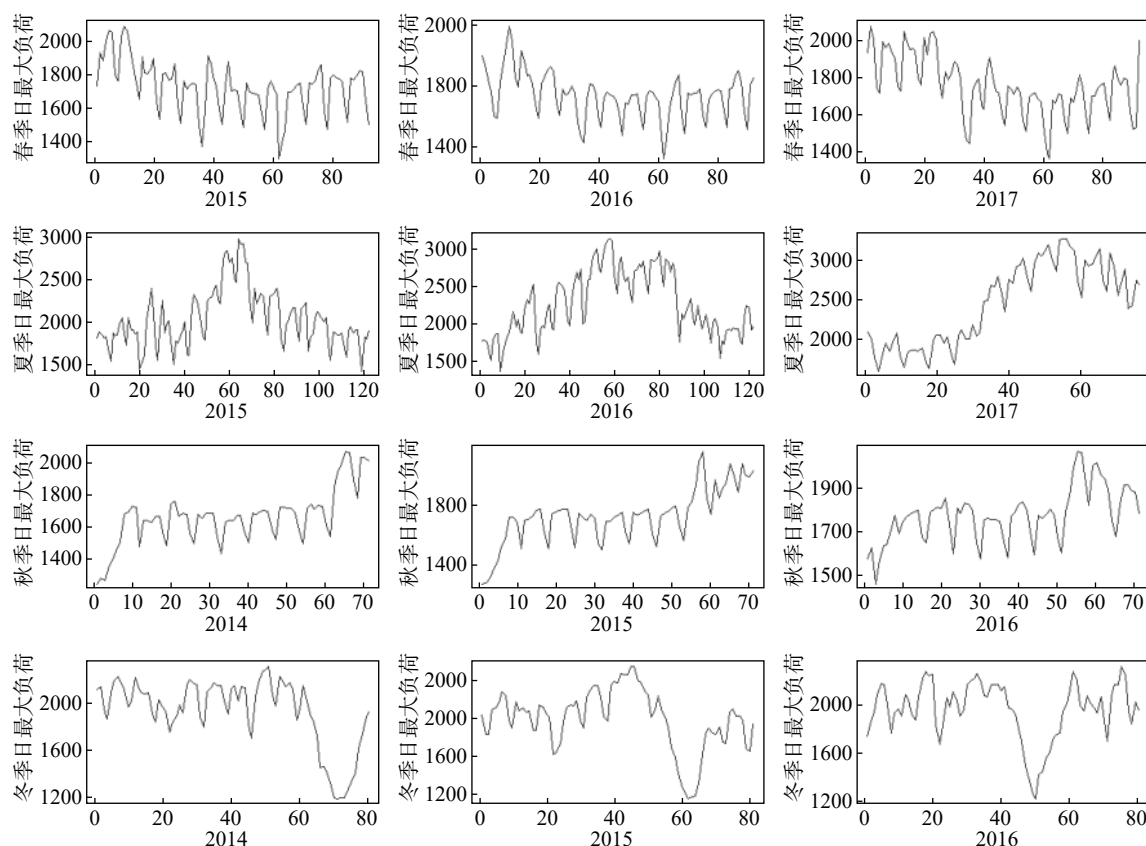


图 2 近三年的四季日最大用电负荷图

数据来源：上海市电力公司日最大用电负荷数据。

用春季和秋季的平均值作为基础用电负荷的估计,使用横表 24 个时点的负荷数据,我们估算了 2000—2017 年夏季一天 24 个时点上的最大降温用电负荷(如图 3 所示)。

从图 3 中可以直观地看到自 2000—2017 年以来上海市每年夏季降温用电负荷在各个时点上的最大值曲线始终呈现出“二谷二峰”的变化态势。夏季下午 14 点左右的峰时最大,降温用电负荷值最高,其次是晚上 21 点左右;早晨 6 点左右的谷时最大降温用电负荷值最低,其次是傍晚 18 时左右。十八年来,夏季各时点的上海最大降温用电负荷值都逐步上升,体现了经济的发展增加了电力需求。但是,金融危机时期的 2009 年、经济转型时期的 2013—2015 年,上海的最大降温用电负荷表现异常,其中的原因是复杂的,很大程度上与这几年的极端高温天气有关,也有经济转型因素的干扰。下文在估计最大用电负荷和最大基准用电负荷中会进一步处理两者的影响。

分析日最大用电负荷年平均值与 GDP 对数值,我们对两者分别与前一期的差分做相关系数,发现春季的相关系数高达 70.94%,秋季的相关系数是 27.69%,春季日最大用电负荷年平均增长率与 GDP 增长率的相关度更高,秋季较低。从图 4 中可以看到,春季和秋季的基础用电负荷随着时间的推移而呈增长趋势。春季和秋季的气温适宜,经验可知,在这两个季节里,居民生活中基本不开空调,故受气温的影响非常小。

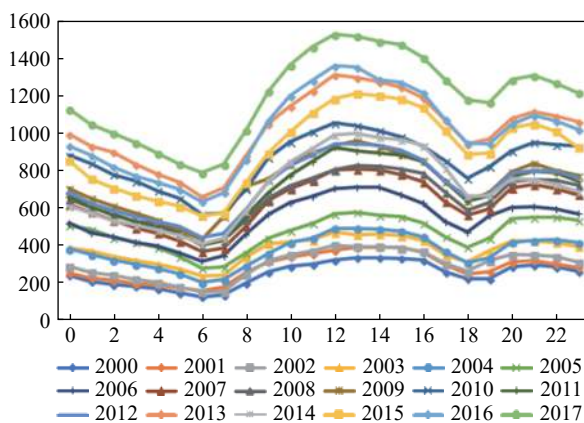
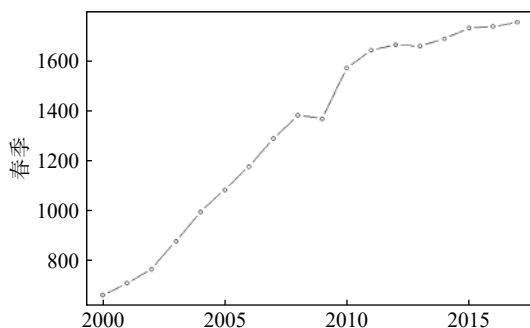
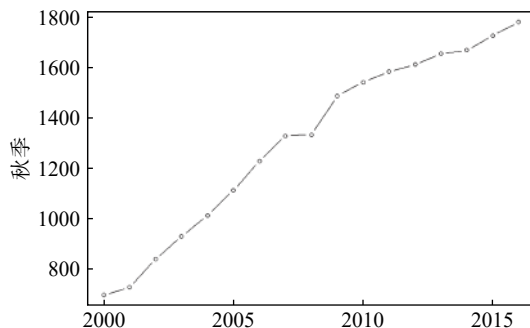


图 3 每年夏季降温用电负荷最大值图

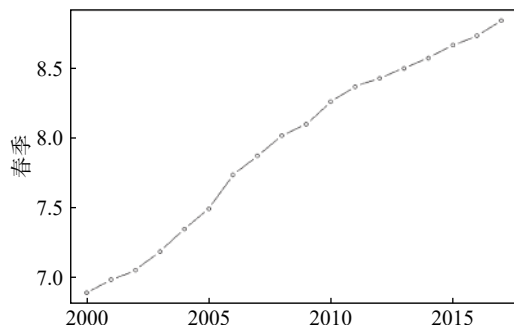
数据来源:笔者依据上海市电力公司 24 个时点负荷数据测算。



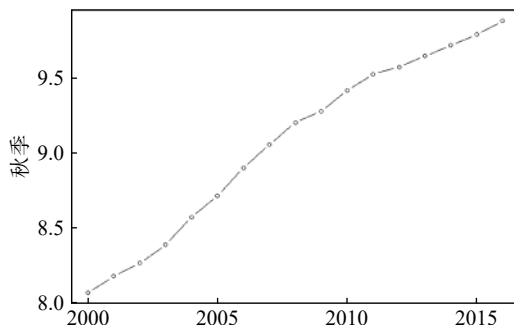
(1) 春季日最大用电负荷年平均值



(2) 秋季日最大用电负荷年平均值



(3) 春季上海GDP对数值



(4) 秋季上海GDP对数值

图 4 上海历年春秋季节最大用电负荷与经济变量

数据来源:上海市电力公司日最大用电负荷数据和上海市 2001—2018 年《统计年鉴》

因此,我们总结出以下结论:(1)在温度适宜的情况下,基础用电负荷主要受经济变量的影响;(2)降温(取暖)用电负荷不仅受到气温的影响,还受到经济变量的影响,即随着经济的发展带来的人民

收入的增长,空调装机的数量增加,因此,用电负荷也随之增加;(3)在特定时间段内,当温度一定(夏季气温足够高)时,空调(降温)设备接近完全启动,用电负荷(降温)基本趋于稳定。因此,当气温足够高时,我们可选择适当的温度值定义为基准温度,其对应的用电负荷称之为最大基准用电负荷(下面会给出精确定义)。最大用电负荷围绕最大基准用电负荷的波动仅与温差有关,这就可用于解决下文的最大基准用电负荷的估计和最大用电负荷的预测问题。

三、估计模型与指数编制方法

(一) 最大用电负荷估计和预测模型

考虑到式(1)中经济变量 E 取定值,当温度 T 足够高,最大用电负荷趋于基本稳定。因此,可以认为此时的最大基准用电负荷是稳定的。

为此,假定经济变量取定值 $E=E_r$, 温度达到较高的值 T_r (本文称之为“基准温度”), 存在一个客观的最大用电负荷 V_r , 其含义是经济发展到一定阶段, 温度足够高时所需配置的用电设备最大用电功率的加总, 本文称其为“最大基准用电负荷”。 V_r 存在但是不可观测。实际可观测的最大温度是 T_m , 最大用电负荷是 V_m , 由于基准温度足够大, 在基准温度附近的负荷值趋于稳定, 因此, 最大用电负荷 (V_m) 围绕最大基准用电负荷 (V_r) 上下波动, 这种波动幅度小, 且可认为仅由温差 T_m-T_r 引起的。

基于上述分析, 最大基准用电负荷与最大用电负荷的函数关系式如下表示:

$$\begin{cases} V_r = V_r(E_r, T_r) = \max F(E_r, T_r) \\ V_m = \max_{E, T} Y = \max_{E, T} F(E, T) \end{cases}$$

由此我们可构建最大基准用电负荷与最大用电负荷的对应关系如下:

$$\frac{V_m - V_r}{V_r} = H(T_m - T_r) \times e^\varepsilon \quad (4)$$

其中, $H(T_m - T_r)$ 是以 $T_m - T_r$ 为自变量的未知函数, ε 是随机误差项, 将 e^ε 看成一个正向的扰动项。假定 $H(T_m - T_r)$ 能在原点附近以幂级数展开, 则可以得到:

$$V_m = V_r \times \left[1 + \sum_{i=1}^{\infty} K_i \times (T_m - T_r)^i \right] \times e^\varepsilon \quad (5)$$

若考虑 n 期时间上最大用电负荷值的变化 ($t=1, 2, 3, \dots, n$), 则在每期的 E_r , V_m 和 T_m 不同, 但是基准温度 T_r 相同, 故可将式(5)写成时间序列形式的 n 个方程:

$$V_{m,t} = V_{r,t} \times \left[1 + \sum_{i=1}^{\infty} K_{i,t} \times (T_{m,t} - T_r)^i \right] \times e_t^\varepsilon \quad (6)$$

式(6)中已知 $V_{m,t}$, $T_{m,t}$ 和 T_r , 求解 $V_{r,t}$ 和 $K_{i,t}$ 存在困难, 为求解方便, 我们简化式(6)。(1)由于函数 $H(T_{m,t} - T_r)$ 的性质与 E_r 无关, 并且时间的变化仅表现在最大温度 $T_{m,t}$ 上, 即有 $K_{i,t} = K_i$, 对所有的 i, t 均成立;(2) $H(T_{m,t} - T_r)$ 事实上是一个很小的量, 将其以幂级数完全展开是没有必要的, 一般使用一次或二次项就能保证精度, 故而取一次型 ($i=1$) 近似得到:

$$V_{m,t} = V_{r,t} \times [1 + K_1 \times (T_{m,t} - T_r)] \times e_t^\varepsilon, \quad t = 1, 2, 3, \dots, n \quad \text{这里, } K_1 = \begin{cases} K_1^1, & T_{m,t} \geq T_r \\ K_1^2, & T_{m,t} < T_r \end{cases}, \quad (7)$$

K_1 可看作单位温差 $T_{m,t} - T_r$ 下最大用电负荷和最大基准用电负荷之间的变化率, 比较 $T_{m,t}$ 与 T_r , 将 K_1 分为两段, 以提高精度。因此, 若得到 K_1 的值, 通过式(7)便可得到最大基准用电负荷 $V_{r,t}$ 的序列。

如果用直接的代数迭代算法来计算式(7)中 $n+2$ 个未知参数, 需要假定诸多前提条件, 这会造成计算的繁琐并且精度较差。本文用统计拟合方法估计最大基准用电负荷序列, 算法思想直观, 且计算简洁方便。

首先, 将式(7)取对数变形如下:

$$\ln V_{m,t} = \ln V_{r,t} + \ln [1 + K_1 \times (T_{m,t} - T_r)] + \ln e_t^\varepsilon = \ln V_{r,t} + K_1 \times (T_{m,t} - T_r) + \varepsilon_t \quad (8)$$

这里, K_1 同式(7), ε_t 是误差项。式(8)是一个线性回归模型, 待估参数是 $V_{r,t}$, K_1^1 和 K_1^2 。进入 21 世纪以来, 上海市的经济和城市化进程都得到了快速发展, 所以, 直观上可知 $V_{r,t}$ 是在 n 期上随着时间 t 逐

年增加,且呈指数型增长。

其次,为估计式(8),我们需要选择 $\ln V_{r,t}$ 的初始序列 $\{a_t\}$,使其与 $\{\ln V_{r,t}\}$ 的趋势保持一致,考虑社会经济实际情况,我们认为 $\{\ln V_{r,t}\}$ 的趋势蕴含在 $\{\ln V_{m,t}\}$ 中,为了更好地去除噪声对 $\{\ln V_{r,t}\}$ 的影响,对 $\{\ln V_{m,t}\}$ 作三期移动平均(实证部分基于数据特征采用两期移动平均),记为:

$$b_t = \frac{\ln V_{m,t} + \ln V_{m,t-1} + \ln V_{m,t-2}}{3}, t = 3, \dots, n$$

再将 $\{\ln V_{m,t}\}$ 和 b_t 做回归以提高计算精度,故而得到回归系数 $\hat{\beta}$,我们令初始序列为:

$$a_t = \hat{\beta} \times b_t, t = 3, \dots, n$$

则将模型式(8)改成如下形式:

$$\ln V_{m,t} = \alpha + \gamma a_t + K_1 \times (T_{m,t} - T_r) + \varepsilon_t, t = 3, \dots, n \quad (9)$$

其中, $\ln V_{r,t} = \alpha + \gamma a_t$, K_1 在线性模型式(9)中是哑变量,同式(7)。因此,式(9)中的待估参数是 α , γ , K_1^1 和 K_1^2 ,共4个,只要样本量足够大,用 OLS 方法就能估计这些参数。此外,我们在估计过程中将时间 t^* 上的异常值已剔除。

(二) 最大基准用电负荷指数

最大用电负荷估计和预测模型是一种有效分析电力数据的实用算法,但是其分析的对象是每年的最大用电负荷,因此,数据使用效率大大降低,导致损失了部分有用信息。该估计方法没有考虑负荷的堆积效应,即持续几天高温后常会有高峰负荷;用一天的数据解释全年的经济变化有点牵强;用模型预测日用电负荷的误差较大等。为此,本文在最大用电负荷估计方法的基础上,用特征指数(Hedonic)技术建模,从而形成最大基准用电负荷指数,该指数可以估计月度、季度甚至频率更高的数据。

特征指数方法通常应用在编制住房价格指数方面^①,价格指数用以下形式表示:

$$Index_t = \frac{\hat{P}_t}{\hat{P}_{t-1}} = \frac{F_t(X_1, X_2, \dots, X_k)}{F_{t-1}(X_1, X_2, \dots, X_k)},$$

其中, $Index_t$ 是价格指数, P_t 表示交易价格, $\hat{P}_t$ 表示通过模型拟合的价格。特征价格函数 $F_t(X_1, X_2, \dots, X_k)$ 表示价格是特征 $(X_1, X_2, \dots, X_k)$ 的载体。重复交易模型(Repeat Sale Method)是将一定时期内同一住房单元交易的两次及两次以上的价格都计入指数的数据范围,保证指数编制的同质性。本文在构建最大基准用电负荷指数时采用特征指数方法和重复交易模型的思想,将时间序列的样本点作为特征处理,从而构建模型。

最大用电负荷估计模型已经证明了最大基准用电负荷曲线是客观存在的,且在一定条件下趋于稳定。据此,对峰值负荷而言,当气温足够高时,存在一条基准用电负荷指数,也就是说当气温大于临界值时,峰值负荷也是某种形式的“平均”。

首先,界定临界气温 T_0 。定义样本内的用电负荷值是指在该期最大用电负荷值附近,且气温大于临界值的数据。我们以季度数据为例,在统计出每季最大用电负荷样本后,构建如下乘法模型:

$$V_t^j = \alpha_1^{T_{1j}^1} \times \dots \times \alpha_l^{T_{lj}^l} \times \beta_1^{h_1} \times \dots \times \beta_6^{h_6} \times \left(\frac{I_1}{I_0} \times \dots \times \frac{I_t}{I_{t-1}} \right)^{s_t} \left(\frac{I_{t+1}}{I_t} \times \dots \times \frac{I_n}{I_{n-1}} \right)^{1-s_t} \times e^\varepsilon \quad (10)$$

其中, $t = 1, 2, 3, \dots, n$ (年)。这里, t 表示年度标记, j 表示样本点标记, V_t^j 表示进入样本内的最大用电负荷值。 $\alpha_1^{T_{1j}^1} \times \dots \times \alpha_l^{T_{lj}^l}$ 表示积温的影响,其中 α 是待估参数, T_{ij}^l 是 V_t^j 样本点所对应的时点气温值, $T_{ij}^k (k = 1, \dots, l-1)$ 是 V_t^j 样本点前若干天的气温值,以考虑用电负荷的堆积效应, l 是积温期长度,一般是二到四日; $\beta_1^{h_1} \times \dots \times \beta_6^{h_6}$ 表示每周不同日的影响,通常工作日与周末的用电负荷数量和结构都不尽相同,因此,本文将周一至周六不同日用哑变量 $h_u (u = 1, \dots, 6)$ 表示, V_t^j 所对应星期的 h_u 取 1,其余取 0,其中,周日全部取 0; I_t 是待估参数,即 V_t^j 样本点所对应的最大基准用电负荷指数值, n 是总年度数, s_t 是哑变

① Witte, A., Sumka, H., & Erekson, H., "An Estimate of a Structural Hedonic Price Model of the Housing Market: An Application of Rosen's Theory of Implicit Markets," *Econometrica*, 1979, 47(5), pp. 1151-1173.

量，当 V_t^j 是第 t 年的最大用电负荷，则为 1，否则是 0； ε 是误差项。

模型（10）式是利用基期和多个样本期所建立的特征指数（Hedonic）模型，在模型中还以星期的哑变量标识样本所属的不同日期，以年份的哑变量标识最大基准用电负荷指数值的不同形式，从而在原有的最大用电负荷估计模型的基础上添加更多有效的信息特征，构成完整的最大基准用电负荷指数模型。

为求解模型式（10），首先对其取对数简化如下：

$$\ln V_t^j = \sum_{u=1}^l T_{tj}^u \ln \alpha_u + \sum_{v=1}^6 h_v \ln \beta_v + s_t \sum_{w=1}^t \ln \frac{I_w}{I_{w-1}} + (1 - s_t) \sum_{p=t+1}^n \ln \frac{I_p}{I_{p-1}} + \varepsilon \quad (11)$$

其中， $t=1, 2, 3, \dots, n$ （年）。从而将式（10）转换成典型的线性模型，待估参数包括 α_u, β_v 和 I_w ，通过线性 OLS 估计方法，可以估计 $\frac{I_w}{I_{w-1}}$ ，从而得到最大基准用电负荷指数。

下文是对最大用电负荷估计模型和最大基准用电负荷指数方法的实证应用。

四、实证结果分析

实证分析使用的数据与上文使用的数据相同。本文以上海市 2000—2017 年电力数据、温度数据和经济变量的数据为例，用最大用电负荷估计模型估计 $V_{r,t}$ ， K_1^1 和 K_1^2 ，预测 $V_{m,t}$ ，用特征指数（Hedonic）方法构建最大基准负荷指数，并对其给予经济学意义的解读和分析。

（一）数据描述性统计

下文使用上海市电力公司的日用电负荷数据表为主要研究对象，为了对上海市的电力数据、温度数据有直观的认识，我们分析了上海市 2000 年 3 月 1 日—2017 年 8 月 15 日电力公司共 6377 天的用电负荷数据和日温度数据，变量包括日电量、日最大负荷、日最小负荷、日最高温度和日最低温度，表 1 对全样本和各年份的数据分别进行了描述性统计。

表 1 日用电负荷数据的描述性统计

电力数据									
年份	日电量（亿千瓦时）			日最大负荷（万千瓦）			日最小负荷（万千瓦）		
	平均数	中位数	标准差	平均数	中位数	标准差	平均数	中位数	标准差
全样本	2.98	3.02	0.98	1463.90	1467.60	487.48	948.24	973.10	307.48
2000	1.50	1.45	0.19	744.24	723.35	103.45	473.24	461.15	54.08
2001	1.58	1.53	0.21	785.58	761.10	115.92	498.15	485.60	55.79
2002	1.72	1.70	0.23	857.91	841.20	127.10	540.20	533.00	59.70
2003	1.99	1.91	0.29	989.06	958.70	152.90	626.09	603.40	81.39
2004	2.20	2.13	0.29	1083.48	1051.40	148.94	699.87	679.35	79.86
2005	2.47	2.39	0.34	1214.75	1175.80	174.12	785.26	762.10	91.54
2006	2.69	2.58	0.42	1321.52	1272.50	216.65	857.28	826.00	114.22
2007	2.92	2.80	0.46	1436.36	1385.60	242.58	931.12	903.30	127.84
2008	3.09	2.96	0.47	1520.58	1446.65	245.22	990.15	952.40	132.74
2009	3.14	3.07	0.47	1544.85	1509.20	246.67	1001.10	983.90	133.02
2010	3.53	3.33	0.57	1727.29	1629.30	298.74	1137.28	1080.70	164.08
2011	3.66	3.53	0.53	1794.48	1740.90	283.99	1174.52	1139.00	149.32
2012	3.68	3.59	0.55	1821.17	1772.10	291.65	1171.92	1138.35	154.95
2013	3.85	3.59	0.72	1894.93	1774.40	376.32	1220.78	1141.00	207.40
2014	3.73	3.67	0.50	1820.76	1789.90	269.92	1183.28	1168.70	136.23
2015	3.83	3.74	0.55	1877.14	1832.70	295.01	1219.60	1196.00	149.15
2016	4.03	3.84	0.71	1977.62	1877.05	378.35	1290.49	1227.35	202.47
2017	4.18	3.98	0.88	2037.56	1945.70	453.69	1337.44	1275.00	264.59

数据来源：笔者依据上海市电力公司用电负荷数据整理所得。

从表 1 中可知,随着时间的推移,日电量、日最大负荷、日最小负荷三个变量都逐年增加,主要是因为经济社会环境的发展,对电力的需求逐年增加,从一定程度上反映了上海市十八年来的工业、服务业的发展和城市化进程。三个指标的波动程度也随之更加剧烈,说明经济社会的工作时间和非工作时间的特征更加明显,而特征指数算法下的最大基准用电负荷指数法很好地使用了数据背后更为丰富的信息,将不同星期作为哑变量放进模型中。此外,日最大负荷与日最小负荷的差距逐年扩大,这差距中不仅包含了经济因素还有温度因素的混合。

本文用“用电负荷旋风图”来表示以上数据特征。我们将用电负荷数据为横轴,以季节序号为纵轴,将 6377 个观测点画到同一个图内(如图 5)。图 5 中每一横条上的点是当季日最大用电负荷(深色点)和日最小用电负荷(浅色点)的排序,可以清晰地看到样本内七十季日用电负荷的分布结构像一个旋风(Cyclone)的投影,直接反映了上海市 2000 年以来经济社会的迅猛发展,即随着时间的推移,日最大用电负荷和日最小用电负荷的最大值和最小值不断增加,最大值与最小值的波动也在不断增加。

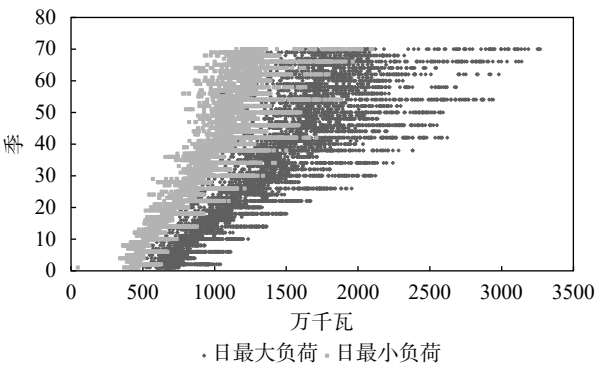


图 5 用电负荷旋风图

数据来源:上海市电力公司用电负荷数据。

而表 2 反映了温度具有季节性变化,较少受到经济社会的发展影响,与经济因素基本是相互独立的。

表 2 日温度数据的描述性统计

温度数据						
年份	日最高温度(摄氏度)			日最低温度(摄氏度)		
	平均数	中位数	标准差	平均数	中位数	标准差
全样本	21.59	22.70	9.32	15.06	15.8	8.74
2000	23.56	24.60	7.76	17.11	18.00	7.41
2001	21.37	23.00	9.10	14.89	15.50	8.51
2002	21.66	21.60	8.53	15.04	15.60	7.91
2003	21.55	22.50	9.85	14.79	15.00	9.07
2004	21.96	23.15	9.07	15.12	15.65	8.62
2005	21.58	23.20	10.26	14.65	16.10	9.61
2006	22.17	23.40	9.37	15.55	16.20	8.65
2007	22.27	22.40	8.98	15.68	15.30	8.33
2008	21.38	22.20	9.69	14.65	15.00	9.15
2009	21.55	24.20	9.49	14.92	16.70	8.90
2010	21.23	21.00	9.49	14.64	14.10	9.07
2011	21.00	22.00	9.83	14.43	16.00	9.28
2012	20.63	22.45	9.74	14.54	15.80	8.97
2013	21.81	22.40	9.99	15.08	15.20	9.33
2014	20.84	21.90	8.33	14.85	15.80	8.08
2015	20.95	23.20	8.54	14.80	16.00	8.00
2016	21.48	22.10	9.26	15.46	16.05	8.72
2017	22.30	22.90	10.01	15.37	16.30	9.14

数据来源:笔者依据上海市电力公司温度数据整理所得。

(二) 最大用电负荷估计和预测

以年最大用电负荷为研究对象,假定最高基准温度 T_r 为 38.7 摄氏度,表 3 分别是采用两期、三期和四

期的序列 $\{b_t\}$ 移动平均所估计的参数值及标准误,移动平均的期数不宜过长,否则会造成趋势太光滑,使得精度变差。根据估计得到的结果可看到四期移动平均的调整的 R^2 最低;三期移动平均次高;而两期移动平均最高。表4是用最大用电负荷估计模型预测得到的MSE^①,可以发现两期移动平均的MSE最低,精度最好;三期移动平均的MSE次低;而四期移动平均的MSE最高,精度最差。因此,采用两期移动平均更为合适。

表3 最大用电负荷估计和预测模型

	两期移动平均的估计值	三期移动平均的估计值	四期移动平均的估计值
α	0.2553 [0.1504]	0.6860*** [0.1872]	1.1076*** [0.2166]
γ	1.0067*** [0.0210]	1.0022*** [0.0274]	1.0072*** [0.0334]
K_1^1	-0.0015 [0.0112]	0.0077 [0.0130]	-0.0008 [0.0143]
K_1^2	0.0287** [0.0128]	0.0293* [0.0150]	0.0399** [0.0166]
调整的 R^2	0.9948	0.9911	0.9865
p-value	1.151e-15	3.926e-13	3.915e-11

注: *表示90%水平显著, **表示95%水平显著, ***表示99%水平显著。

表4 最大用电负荷估计模型的预测均方差

	两期移动平均	三期移动平均	四期移动平均
MSE	2662.162	2919.649	3318.067

图6是在表3模型基础上的预测图,最大用电负荷预测值基本与最大用电负荷值(V_m)一致,并且估计得到的最大基准用电负荷(V_r)序列也能反映最大用电负荷值的趋势变化,其中两期移动平均的最大用电负荷估计值与其观测值基本重合,预测效果最好。

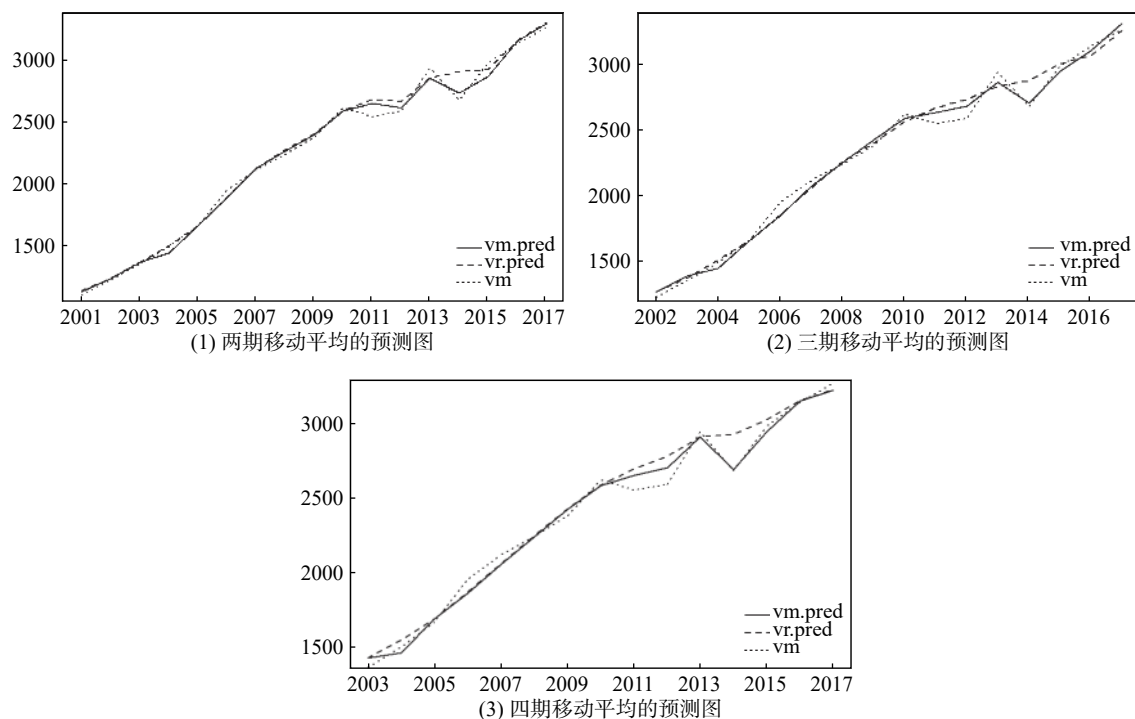


图6 最大用电负荷和最大基准用电负荷序列预测图

① MSE, 即均方误差, 是。

本质上,最大用电负荷估计模型利用的是在高温气候和很高用电负荷的“极端”条件下,最大用电负荷仅与温度有关,而剥离出的最大基准用电负荷主要受经济变量影响的特点。这为我们对经济变量的解读、经济形势的预判和研究提供了新的视角和数据支持。以最大基准用电负荷为桥梁预测最大用电负荷的精准度较高。在以上的模型框架下,我们估计出不可观测的最大基准用电负荷 (V_r) 序列,该序列在固定基准温度 T_r 下,主要由经济变量所影响。我们在改变基准温度的情况下,分别用 38.7°C、39°C 和 39.4°C 三个基准温度,采用两期的移动平均计算最大基准用电负荷序列 (如图 7 所示)。

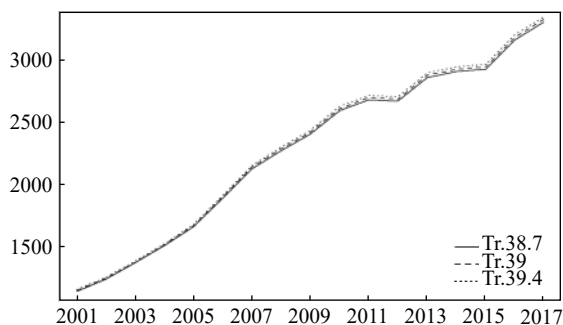


图 7 不同基准气温下的最大基准用电负荷 $V_{r,t}$ 的估计序列

从图 7 中可知,随着基准温度的提高,整条曲线向上移动,这与常识相符,即最大基准用电负荷随着温度的上升而增加。但是三条曲线的趋势和形状几乎不变,这是因为曲线的形状是由经济变量所决定的。因此,最大基准用电负荷 $V_{r,t}$ 的估计序列不仅能用来预测最大用电负荷 ($V_{m,t}$),而且作为经济分析的变量,具有实用性和可操作性。由式 (1) 可知,选取的经济变量不同,最大基准用电负荷 $V_{r,t}$ 的估计也会不同,即确定经济变量的类型后,需要构造相应的 $V_{r,t}$ 序列,这依赖于初始序列 $\{a_t\}$ 的选择。其中,经济变量是指全社会的经济状况,包含生产、生活、办公和商业等各个方面,下面我们选择生产过程中的经济变量为 GDP 来考察,由于 GDP 本身是平滑的,故不再做移动平均的处理。

分别对应经济变量 GDP,一产、二产、三产的 GDP 值作为最大基准用电负荷估计初始序列的“原材料”的 $\{b_t\}$,进而估算 $V_{r,t}$ 序列 [$V_{r,t} = V_r(\text{GDP}_t, T_r)$]。我们定义 GDP 单位产值电耗估计值 ($\hat{V}_{r,t}/\text{GDP}$)。图 8 是在基准温度 38.7°C 计算的 GDP 单位产值电耗估计值。从图 8 (1) 可以看到,十八年来上海市节能减排和产业转型是很有成效的,但是从整体图形来看,这种下降趋势逐步放缓,意味着降低 GDP 产值电耗会愈加困难,其中,三产的 GDP 单位产值电耗估计值的趋势与 GDP 的趋势一致,并且下降趋势更加缓

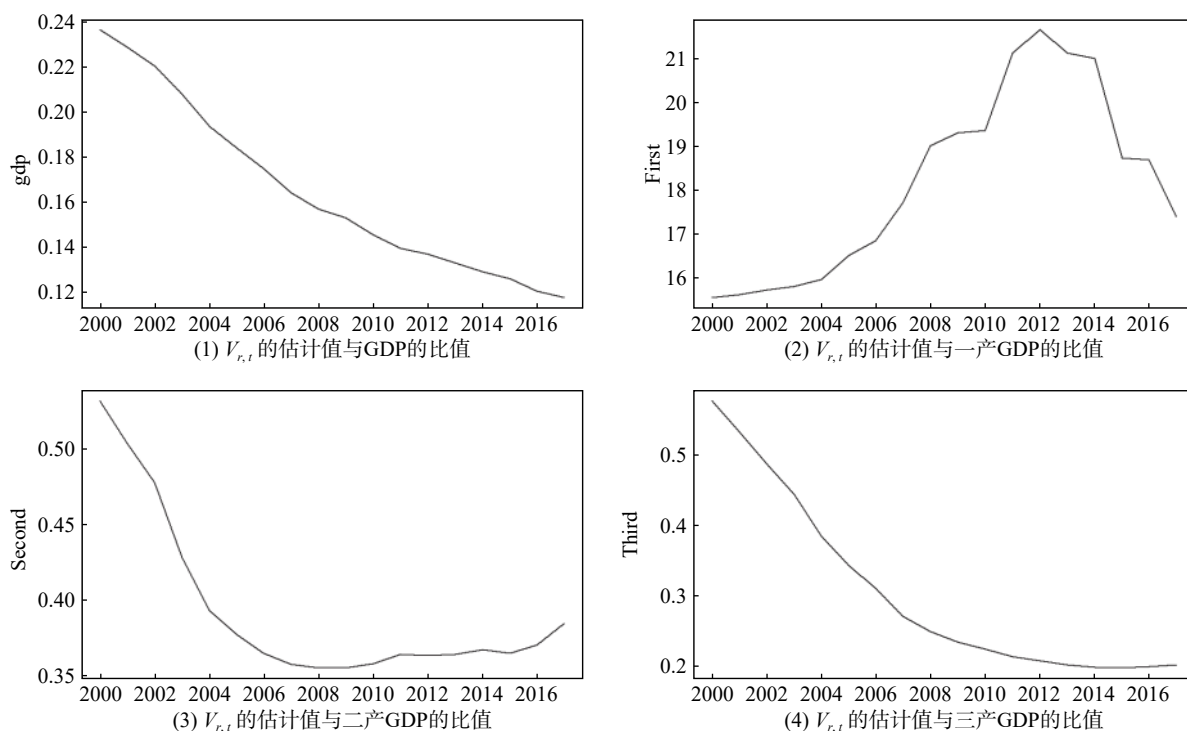


图 8 最大基准用电负荷与经济变量的关联关系

慢。二产在 2008 年、2009 年单位产值电耗最低，在 2015 年以后出现上升的趋势，2017 年的单位产值电耗估计值出现“小峰”，推断可能是因为经济危机后期和经济转型过程中，全社会国民生产总值增速有所下滑造成的。一产在 2012 年之前电耗增加趋势明显，而近几年有显著的下降，体现上海市在乡村振兴战略方面得到了实质性的成效。从一定角度说明，上海市的三产受经济危机的影响不明显，二产在经济转型过程中影响显著。

（三）最大基准用电负荷指数

我们以上海市日最大用电负荷数据为研究对象，数据总样本有 6377 个，选取三天的积温期，并将夏季和冬季积温期分别计算，要求进入计算的日最大负荷不小于该年日最大负荷的 95%。通过 OLS 模型估计积温参数 α_u （6 个），星期参数 β_v （6 个），以及负荷指数 I_w 与 I_{w-1} 的比值（70 个），由于待估参数较多，文中不报告数值结果，可以计算出季度最大基准用电负荷指数（如图 9）。

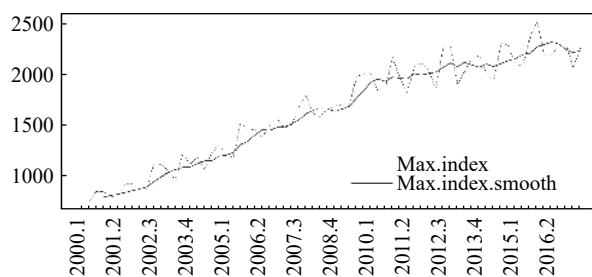


图 9 最大基准用电负荷指数及光滑线

在最大基准用电负荷指数的估计中，待估参数非常多，正如最大用电负荷估计和预测模型结果中表现的那样，存在着不显著的情况，我们通常在分析线性关系时看调整的 R^2 ^①。最大基准用电负荷指数模型中得到的 $R^2=0.9984$ ，均方误差为 0.00025，模型拟合结果较好。

图 9 是估计的最大基准用电负荷指数，可以明显地看到，该指数有四季的周期性特征，因此，对指数做四期的移动平均平滑处理。

从平滑曲线中能直观地看到上海市全社会最大用电负荷的变化趋势，其中，2009 年第二季度由于经济危机的显著影响，经济不景气明显；2014 年以后，全国整体的经济形势从重视 GDP 增长到重视经济结构的优化升级，从要素和投资驱动逐渐转向创新驱动，最大基准用电负荷指数很好地反映出上海整体的经济逐渐趋向稳健；尤其在 2016 年末 2017 年初，经济结构的调整到了攻坚的阶段，高耗能低效落后产能的逐渐淘汰必然造成了这一指数趋向平缓甚至下滑。另外，这种指数方法还能构建月度等更高频率的指数。

我们还将该指数与经济变量 GDP，一产、二产、三产 GDP 做回归分析，从表 5 中可以看到该指数对经济变量的解释都具有显著性影响，其中，与 GDP，二产、三产 GDP 回归的调整的 R^2 较大，反映了三产所占比重最大、二产所占比重其次的上海市产业结构特征。因此，用最大基准用电负荷指数来分析经济形势和产业结构的变化是可行的和客观的。

表 5 最大基准用电负荷指数与经济变量的关系

	GDP	一产GDP	二产GDP	三产GDP
估计值	0.7662***[0.0774]	0.3819***[0.1113]	0.7057***[0.0853]	0.7794***[0.0754]
调整的 R^2	0.5810	0.1335	0.4908	0.6018
p-value	6.953e-15	0.0010	6.291e-12	1.18e-15

注：* 表示 90% 水平显著，** 表示 95% 水平显著，*** 表示 99% 水平显著。

我们用“最大基准用电负荷指数法”研究夏季用电负荷，构建夏季日最大用电负荷指数、夏季日最大降温负荷指数、基础负荷指数和夏季日用电量指数（如图 10）。

从图 10 中能直观地看到，日用电量指数与日最大用电负荷指数基本同趋势，这两个指数是经济与温度变量的综合反映；基础负荷指数较为平稳，只受经济因素的影响，不受温度的影响；最大降温负荷指数的波动与日最大用电负荷指数的波动一致，可以得出，日最大用电负荷的波动主要原因在于降温负荷指数的波动。以上四个指数对预测电力负荷和分析经济变量起着重要的作用。

① A. Colin Cameron, Frank A. G. Windmeijer, “An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models,” *Journal of Econometrics*, 1997, 77, pp. 329-342.

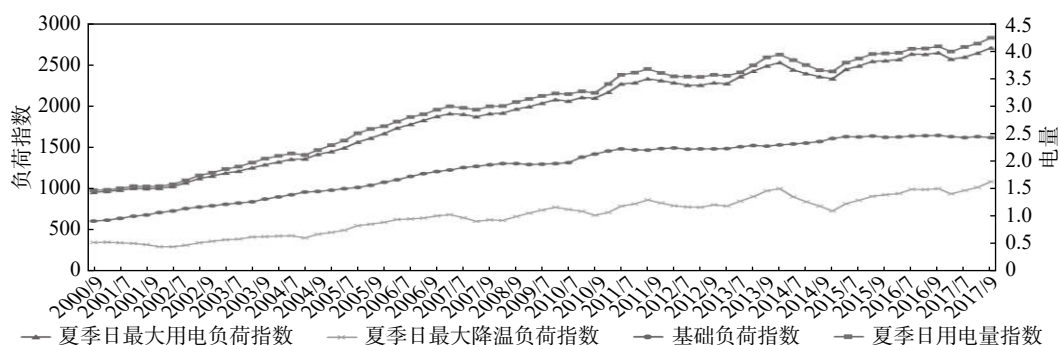


图 10 最大基准用电负荷指数光滑线

五、结论与启示

“最大用电负荷估计和预测模型”和“最大基准用电负荷指数方法”是在电力峰值极端的情况下，固化了经济因素和气温因素的作用，以达到分离因素变量的目的。本文首先揭示了当夏季温度足够高时空调降温用电负荷趋于基本稳定，此时的最大基准用电负荷也相对稳定的事实，发现了经济变量一定时，只要温度足够高，最大用电负荷趋于基本稳定，从而能够在“极端”气温和用电负荷的条件下分析基础负荷和降温（取暖）用电负荷，提出一种对不可观测最大基准用电负荷（ V_r ）序列的估计方法，不仅能准确地预测最大用电负荷（ V_m ），还能分析经济转型过程中，一产、二产和三产分别的表现。

本文通过特征指数（Hedonic）法建立季度甚至月度最大基准用电负荷指数，分析其与经济变量之间的关系；此外构建夏季日最大用电负荷指数、夏季日最大降温负荷指数、基础负荷指数和夏季日用电量指数，从而剥离出基础负荷指数平稳的特性，说明其与经济因素的关联关系，而不受气温因素的影响，日最大用电负荷指数与最大降温负荷指数的波动一致，体现日最大用电负荷指数与日用电量指数是由经济与温度变量的综合反映，其波动主要原因在于降温负荷指数的波动，这四个指数对于我们分析和预测电力负荷和经济变量具有良好的作用。

以上海为例，我们发现上海在过去十八年来节能减排和产业转型是很有成效的，尤其是二产的 GDP 单位产值电耗估计值在经济转型过程中在 2015 年以后出现上升趋势，而三产受经济危机的影响不明显。2014 年以后，全国整体的经济形势从重视 GDP 到重视经济结构的优化升级，最大基准用电负荷指数正好地反映出上海整体的经济逐渐趋向稳健；尤其在 2016 年末 2017 年初，经济结构的调整到了攻坚的阶段，高耗能低效落后产能的逐渐淘汰造成最大基准用电负荷指数趋向平缓。

十八大以来，尤其是随着中国经济发展进入新常态的阶段，以北上广为代表的超大城市面临转型升级的要求，全国经济发展的“排头兵”是超大城市的责任和使命。但是，面对人口趋于饱和的现状，经济结构的优化使得高耗能低效率的产能逐步淘汰，从而出现经济发展的阵痛期。就上海而言，正处于转变发展方式、优化经济结构、转换增长动力的攻关期，需要寻找新的经济增长点，发展低耗环保的新经济业态，推动新型工业化、信息化、农业现代化同步发展，提高全要素生产率，推动经济发展质量变革、效率变革和动力变革。

用电负荷的研究不仅可以应用在分析经济变量的趋势预测和分析上，还可以研究消费者行为等；用电负荷的数据庞大和复杂，未来我们会对用电负荷的数据所蕴含的信息通过数据挖掘和机器学习的方法进行更深的处理和分析。一方面，进一步挖掘和研究“用电负荷旋风图”，分析日最大用电负荷和日最小用电负荷分别与经济、气温因素的关联关系；另一方面，对夏季日最大用电负荷指数、夏季日最大降温负荷指数、基础负荷指数和夏季日用电量指数四个指数进行分析，探索其与经济变量之间的关系；此外，将来可以尝试用现代计量经济学的方法构建用电负荷与经济变量的模型，将本文提到的经济变量与气温对用电负荷的复杂非线性特征的多值函数加以模型化。

(本文为国家自然科学基金面上项目“非线性动态因子模型和函数型时间序列的前沿理论及其应用”(71773078)、国家自然科学基金青年项目“处理效应模型的非参数估计方法及其拓展应用”(71803134)和上海社会科学院创新工程数量经济学学科团队建设项目的阶段性成果。感谢上海社会科学院数量经济研究中心姜国麟研究员和美国罗格斯大学统计系陈嵘教授对本文所提供的创造性思想和建议。)

(责任编辑: 沈敏)

A Study on the Relationship between Maximum Power Load and Economic Variables

ZHU Pingfang, XIE Ruqing, LIU Panpan

Abstract: This paper introduces a kind of estimation method of the unobservable base maximum power load and forecasting the maximum power load, then use Hedonic Method to construct the base maximum power load index and explore its relationship with economic variables. The influence of economic and temperature factors on the power load are separated. Then the base maximum power load sequence is estimated. We use yearly and seasonal base maximum power load index of Shanghai as an example, finding that this index is highly matching with economic development, reflecting the characteristics of Shanghai industrial structure adjustment. These methods are driven by data, mining the full information of the data, providing a new view of estimating the base power load, and supporting the analysis and forecast of economy more effectively and accurately.

Key words: maximum power load, base temperature, Hedonic Index

(上接第 43 页)

Deepen Land Reform and Rationalize the Economical Operation

ZHOU Tianyong

Abstract: The unclear land property rights making the land element cannot transact competitively by the market have been creating the serious problems in China's national economy. The value of the lands in rural and the lands belong to the state-owned enterprises in urban are lower estimated and hidden. They cannot be traded on the market but have been allocated by the government at low prices even without compensation. Nevertheless, the prices of the lands which are allocated from the countryside to the cities are extremely surging. It is all because the local governments are acting as the dealers, who are the only buyer to expropriate the lands from the countryside but sold them to the thousands of the other buyers. The land factors are somehow limited to the above aspects, meanwhile the labor, capital, technology and other factors can be freely flowing, trading with each other, complete pricing, value expressing and market regulating in accordance with the rules of the market economy. It will lead to the chaos of the national economic operation: The lower general allocate efficiency of the factors, the siltation of the rural surplus labors, the paralyzed movements of the capital elements into the agriculture and the rural areas, the lost opportunities of the farmers using their lands to start a business and obtain the property incomes, are causing the inadequate of the demand of the affordable consumption of the rural residents and the non-registered residence in town. Furthermore, it is the reason causing the surplus productivities of the industrial goods in urban and the sluggish growth of the national economy. The policy implications of the paper are as follows: The truly clear and authorized the peasantry possessing the right of using property interest of the lands, and the sustainable rights to use them. All the types of rural lands can be traded equally in the unified urban and rural market. Farmers have the right to construct their own lands.

Key words: use of property interests, authorized years of land use, administrative restricted transaction, administrative extreme transaction, property income, the right of the land construction