

罗慧,徐军昶,肖波,等. 2016. 气象因子对西安城市用电量的影响研究及中长期系统化预测. 气象, 42(1):54-60.

气象因子对西安城市用电量的影响研究 及中长期系统化预测^{* 1}

罗 慧¹ 徐军昶¹ 肖 波¹ 刘 波² 巩在武³ 刘 杰⁴

1 陕西省西安市气象局, 西安 710016

2 陕西省防雷中心, 西安 710015

3 南京信息工程大学经管学院, 南京 210044

4 中国社会科学院研究生院, 北京 100005

提 要: 城市用电量预测是电力及相关经济部门开展电力供需形势分析的重要依据。本文选取 2004—2014 年西安市用电量月度数据和气象数据, 建立用电量预测的计量经济模型, 在此基础上建立西安市用电量业务化系统, 初步应用于西安市未来用电量预测。结果表明, 气温与西安市用电量之间表现为稳健的正 U 型非线性关系; 西安市用电量需求高峰主要在冬季, 但由于春节等因素, 工业用电量在 2 月大幅减少, 居民用电量却显著增加; 模型对全社会用电量拟合准确, 对未来用电量预测准确率高, 具有开展中长期预测的适用能力; 通过建立西安城市用电量气象业务系统, 将未来天气预报或气候预测结果带入业务系统中, 可滚动预测未来 12 个月可能耗电量, 可为调节电力分配提供科学参考, 提升电力供应的调度管理水平。

关键词: 用电量, 气象因子, 气象业务系统, 中长期预测

中图分类号: P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.01.006

Study on the Impact of Weather on Electricity Consumption in Xi'an and Its Application to Mid-Long Term Prediction

LUO Hui¹ XU Junchang¹ XIAO Bo¹ LIU Bo² GONG Zaiwu³ LIU Jie⁴

1 Xi'an Meteorological Bureau of Shaanxi Province, Xi'an 710016

2 Shaanxi Provincial Lightning Protection Center, Xi'an 710015

3 College of Economics and Management, Nanjing University of Information Science and
Technology, Nanjing 210044

4 Graduate School of Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100005

Abstract: Predicting urban electricity consumption is essential to electricity deployment of the electrical sector. An econometric model is established by using real monthly data from 2004 to 2012 to estimate the impact of weather on electricity consumption. Based on the model estimates, an online operation system of electricity consumption prediction has been initiated and tested for real application. The results show that: (1) There exists a robust and U-shaped relationship between temperature and electricity consumption. (2) The total electricity consumption peaks in winter, and the industrial electricity consumption decreases while the residential increases significantly due to the Spring Festival in February. (3) The simulated values fit quite well with the historical records and the predicted error is less than 5% demonstrating the capability of mid-long term prediction. (4) The operation system, incorporated with weather forecasting data, help calculate continuous possible electricity demand of the next 12 months, which provides useful

* 国家自然科学基金项目(71171115)、西安市软科学项目和江苏省自然科学基金项目(BK20141481)共同资助

2015 年 2 月 23 日收稿; 2015 年 10 月 1 日收修定稿

第一作者: 罗慧, 主要从事气象服务效益评估与气象防灾减灾等研究. Email: qxluohui@163.com

implications for electricity allocation and management.

Key words: electricity consumption, weather factor, meteorological operation system, mid-long term prediction

引 言

近年来,我国电力市场长期存在电力需求与供给之间不平衡现象,进而导致较大的经济损失。对城市用电量进行科学合理的预测有助于电力系统控制和运行,保障电网安全性和经济性,进而提高电力需求侧管理水平。城市用电量受社会经济发展、气候变化以及政策等诸多因素影响,尤其是在气候变化大背景下,气象条件变化对城市用电量影响日益显著。气象条件与用电量二者关系的研究表明,气象因子与用电量之间存在极显著的关系(Comte et al, 1981; Qian et al, 2004; 段海来等, 2009; 杨静等, 2009);在全部气象因子中,气温是影响用电量最重要的因子(胡江林等, 2002; 张小玲等, 2002; 钟利华等, 2008; 李兰等, 2008; 张自银等, 2011);气温与用电量呈非线性关系,即当温度大于一定阈值相关系数为正,小于该阈值为负(胡江林等, 2002; 李兰等, 2008; 盛琼等, 2011)。科学认识气象因子和用电量相关关系是进一步开展城市用电量预测的基础。

因此,研究气象条件变化对城市用电量的影响,开展更深入的预测应用研究可以充分发挥气象服务于经济社会发展的社会效益。现有关于城市用电量预测的研究方法可以分为三类,分别是较常见的多元回归模型(郑贤等, 2008; 杨静等, 2010; 叶殿秀等, 2013)、常规数学模型,如灰色预测模型(王大鹏, 2013)和神经网络模型(罗慧等, 2005; 郭海明等, 2006),以及计量经济学模型(吴向阳等, 2008; 张海东等, 2009)。多元回归模型能够充分考虑各种影响因素,却容易因为因素选择不当造成预测值精度不高。常规数理模型短期预测效果较好,但其预测原理过渡依赖于数学、物理机理,长周期预测和现实应用存在较大局限性。计量经济学模型是数学、统计学以及经济学的有机统一,不仅具有坚实的数理基础做支撑,而且具有非常好的现实解释意义(古扎拉蒂, 2009; 罗慧等, 2012)。

城市用电量变化规律很难用单一数学模型加以描述,任何单一模型的预测精度不可能在所有情况

下都较高。与单一预测方法相比,组合预测方法能集合各种预测方法的优点,具有更高的精度(杨大晟等, 2013)。因此,本文以计量经济学模型为基础,引入气象因子建立西安城市用电量预测模型,能较好地克服常规数理模型与现实影响因素结合不紧密的缺点,又能充分发挥自身预测周期长的优点。在此基础上,定量探讨气象条件变化对西安城市用电量的影响,建立西安城市用电量气象业务系统,为当地经济社会发展战略规划提供科学参考。

1 模型构建与参数估计

1.1 数据特征

本文选取的用电量数据包括 2004—2014 年西安市全社会用电量、工业用电量和居民生活用电量的月度数据,气象数据包括月平均气温、月降水量、月平均风速以及月平均相对湿度。电力消费数据来源于西安市电力局,气象数据来源于西安市气象局,统计分析和建模软件采用 SAS9.1 版本。

图 1a~1c 分别为 2004—2014 年西安市三类用电量月度数据。自 2004 年以来,全社会用电量、工业用电量和居民生活用电量持续上升,特别是 2010 年以后,三类用电量的变化幅度逐渐增大,表明用电量需求不断增长的背后其不确定性也在增大。图 1d 为 2004—2014 年三类用电量月平均值。可以发现,用电量波动变化部分包含季节周期性特征。西安市全社会用电量、工业用电量和居民生活用电量都呈现明显的“双峰结构”。7 和 12 月为用电高峰,4—5 月以及 9—10 月为两个低谷。其中,全社会用电量和城乡居民生活用电量的最高值冬季高于夏季,工业用电量最高值夏季高于冬季。另外,全社会用电量与工业用电量之间存在一致变化趋势,而居民生活用电量变化要明显滞后。例如,在夏季的 8 月与冬季的 2 月,当居民生活用电量达到“波峰”的时候,全社会用电量和工业用电量处于下降的“波谷”阶段。

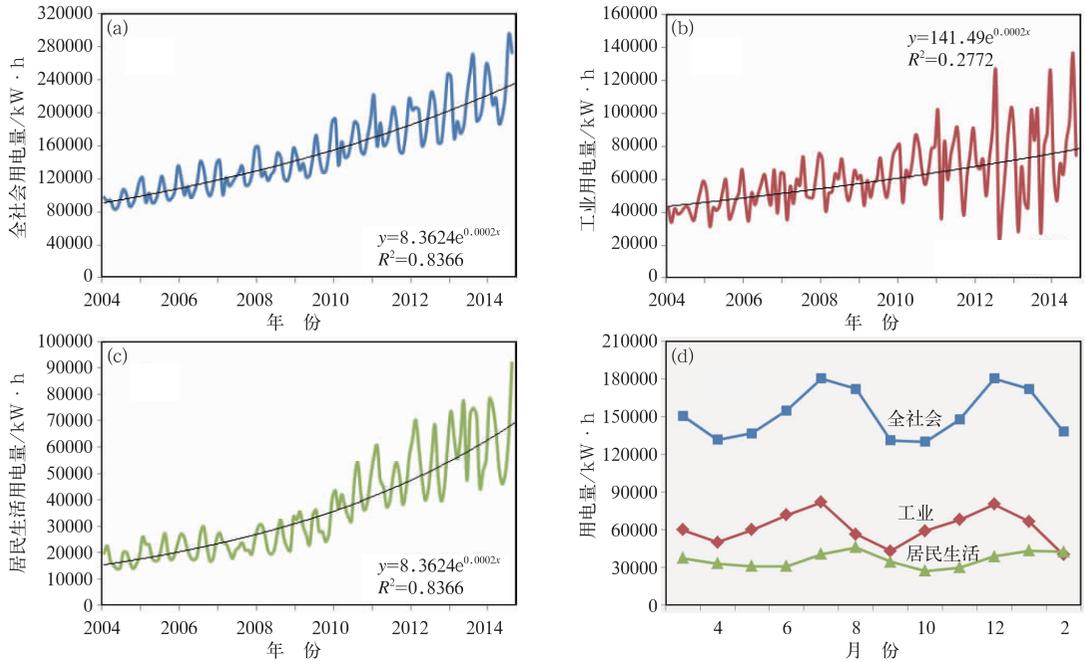


图 1 2004—2014 年西安市三类用电量变化图

(a) 全社会用电量, (b) 工业用电量, (c) 居民生活用电量, (d) 月平均用电量变化

Fig. 1 The aggregate social (a), industrial (b), and residential (c) monthly time series of electricity consumption from 2004 to 2014 in Xi'an City, and the corresponding monthly-averaged variations (d)

1.2 模型的构建

如前分析,由于经济、气候、政策等相关因素影响,西安市用电量具有明显的时间变化趋势、季节周期性波动和随机性波动特征。模型的构建由常数项、时间趋势项、周期性波动项以及随机项组成。

常数项 C 表示满足人们基本生活需求的用电量,不受其他任何因素的影响。时间变化趋势项 t 代表社会经济发展过程中城市规模扩大以及城市人口不断增加对用电量的需求增加。根据图 1 可知,三类用电量基本呈指数增长趋势,尤其是工业用电量与居民生活用电量的指数拟合性较好。

设定月份的虚拟变量 M_t ($t=1, 2, 4, 5, \dots, 12$) 表示季节内的波动变化,例如 $M_4=1$ 表示 4 月, $M_5=1$ 表示 5 月并以此类推,直到 $M_2=1$ 表示 2 月;当这些虚拟变量均为零时 ($M_t=0$) 表示 3 月。除此之外,在诸多气象要素中,气温、降水、湿度及风速四个气象因子对人体舒适度的影响最明显,成为影响电力负荷短期波动的主要因子。根据图 2 可以初步判定,用电量与平均温度之间呈显著的正 U 型非线性关系,与平均风速呈负相关关系,与降水量和相对湿

度的关系不明显,但与降水量的关系更密切 (R^2 值更大)。因此,在模型中分别引入表示温度与用电量之间非线性关系的温度平方项 T^2 ,月降水量 P ,以及月平均风速 W 。

模型形式的设定既要考虑人口增长与城市扩张对用电量的指数效应,又要纳入温度、风速以及降水气象因子的影响,首先将模型数学公式表示如下:

$$E_t = Ae^{\alpha t} P_t^\lambda W_t^\xi T_t^\theta \quad (1)$$

影响用电量因素之间采用乘积形式而非单纯的加总形式,反映了这些因素对用电量的可能非线性影响。式中 E_t 为用电量, $Ae^{\alpha t}$ 为指数增长项, P_t 为月降水量, W_t 为平均风速, T_t 为平均温度。对式 (1) 用对数线性化方法展开,然后将温度项分为线性项与平方项,其中温度的线性变化用月份的虚拟变量 M_t 表示,平方项表示温度与用电量之间的非线性关系,由此可以得到式 (2)。

$$\log E_t = C + \alpha t + \beta_i \sum M_t + \lambda \log P_t + \xi \log W_t + \theta (\log T_t)^2 + (\epsilon_t + \varphi_1 \epsilon_{t-1}) \quad (2)$$

式中, α , β_i , λ , ξ 以及 θ 是需要估计的模型参数, $(\epsilon_t + \varphi_1 \epsilon_{t-1})$ 为随机误差项的 AR(1) 结构, φ_1 为需要估计的参数, ϵ_t 为白噪声随机误差项。模型中所有变

量取自然对数,以减少异常值的影响,并且双对数形式的模型参数具有明显的经济学含义。为了处理数

据存在的自相关问题,模型的随机误差项设定为一阶自回归形式。

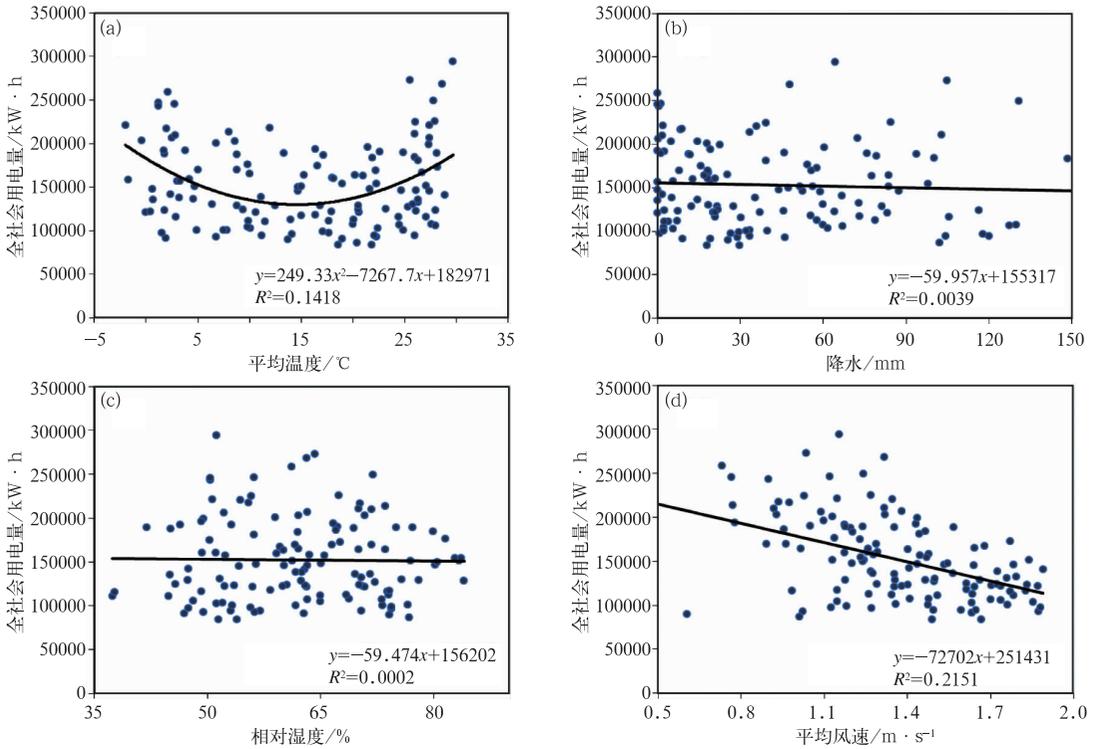


图 2 2004—2014 年西安逐月全社会用电量与气象因子散点图

(a)平均温度,(b)降水,(c)相对湿度,(d)平均风速

Fig. 2 The relationships between monthly aggregate social electricity consumption and meteorological factors in Xi'an City from 2004 to 2014

(a) mean temperature, (b) precipitation, (c) relative humidity, and (d) wind speed

1.3 参数估计与显著性检验

应用 SAS 软件建立西安城市用电量与气象因子的对数模型,采用极大似然估计法,对模型进行参数估计及进行显著性检验(表 1)。三个模型中,时间趋势 t 都具有统计显著性,说明了在经济快速发展的大背景下,随着城市建设进程的加快以及城市人口的增长等因素,城市用电量必然会表现出显著上升的趋势。其中,居民生活用电量涨幅最大,每月增加 1.19%。

在全社会用电量模型中,季节性差异非常显著,主要表现为春季、秋季用电量显著减少,冬季用电量显著增加。例如,相比于 3 月,4 和 5 月全社会用电量将分别减少 17.12%和 17.47%,9 和 10 月全社会用电量将分别减少 17.33%和 17.02%,冬季的 12 和 1 月全社会用电量将分别增加 17.70%和 16.24%,2 月由于春节假期的因素,全社会用电量

反而将减少 7.31%。气象因子中,降水和风速对全社会用电量有负面影响,但均不显著;温度和全社会用电量之间表现出正 U 型的非线性关系,即当低于一定温度用电量随温度升高而减少,超过这一温度以后用电量将随温度升高而增加。从图 1a 可知,该温度临界值约为 15℃。

在工业用电量模型中,只有 12 和 2 月的用电量受季节变化影响显著,冬季 12 月用电量将显著增加 26.59%,2 月用电量显著减少 37.38%。降水对工业用电量有显著影响,当月降水量增加 1%,工业用电量将减少 0.1%。风速对工业用电量影响不显著。温度平方项系数为正,说明温度变化与工业用电量之间存在正 U 型非线性关系。

在城乡居民用电量模型中,春季的 4 和 5 月用电量相比于 3 月将分别显著减少 16.41%和 29.31%;秋季 10 和 11 月用电量将分别显著减少 35.29%和 26.83%;冬季居民用电量显著增加,其中

1 和 2 月居民用电量将显著分别增加 15.93% 和 13.19%。此外,风速对居民用电量影响较大,即风速每增加 1%,居民用电量将显著减少 7.6%,但不

具有统计显著性。同样,温度平方项系数为正也说明温度与居民用电量之间的正 U 型关系。

表 1 模型参数估计及显著性检验

Table 1 Parameter estimation and significance test

解释变量	logE _S		logE _I		logE _R	
	参数	t 统计量	参数	t 统计量	参数	t 统计量
C	11.4165	212.90**	10.5066	62.43**	9.7836	69.46**
t	0.0074	38.73**	0.0049	8.91**	0.0119	19.61**
M ₄	-0.1712	-5.14**	-0.1991	-1.56	-0.1641	-2.40**
M ₅	-0.1747	-2.94**	-0.0340	-0.15	-0.2931	-2.36**
M ₆	-0.1103	-1.24	0.1032	0.31	-0.2945	-1.58
M ₇	0.0137	0.14	0.2379	0.65	-0.0583	-0.28
M ₈	-0.0244	-0.28	-0.1106	-0.35	0.0082	0.05
M ₉	-0.1733	-3.07**	-0.1834	-0.88	-0.1883	-1.56
M ₁₀	-0.1702	-5.32**	0.0404	0.35	-0.3529	-4.73**
M ₁₁	-0.0264	-1.00	0.1451	1.59	-0.2683	-4.15**
M ₁₂	0.1770	6.01**	0.2659	2.54**	0.0343	0.50
M ₁	0.1624	5.60**	0.1545	1.48	0.1593	2.47**
M ₂	-0.0731	-2.97**	-0.3738	-3.92**	0.1319	2.58**
P	-0.02	-1.47	-0.10	-1.84*	0.02	0.67
W	-0.97	-0.34	11.97	1.38	-7.60	-1.01
T ₂	0.02	1.48	0.01	0.18	0.01	0.49
AR(1)	-0.2198	-2.16**			-0.4799	-5.28**
回归 R ²	0.97		0.69		0.95	
DW 统计量	1.96		1.92		2.11	
SBC	-305.77		-9.71		-120.36	
AIC	-352.58		-53.76		-167.17	

注:(1) DW (Durbin-Watson Value) 值在 2.0 附近,说明模型的残差项不存在一阶自相关;

(2) ** 和 * 分别表示 t 统计量通过 0.05 和 0.1 的显著性水平检验。

2 西安城市用电量气象业务系统

在本文建立的三个用电量模型中(表 1),工业用电量模型的回归 R² 只有 0.69,说明对工业用电量有影响的某些因素没有被考虑进本文的模型之中。例如,企业生产计划变化、生产成本以及政府政策都构成了影响工业用电量需求的不确定性因素。全社会用电量和居民用电量模型拟合效果较好,R² 均在 0.95 以上,DW 统计量均在 2 附近,说明模型考虑的因子符合实际,AR(1)的设定较好处理了随机误差存在的一阶自相关。基于上述考虑,本文选定模型拟合度最高的全社会用电量模型构建西安市用电量预测的气象业务系统。

2.1 模型验证

模型验证分为两步,一是根据以上模型的参数

估算结果,将 2004 年 1 月至 2013 年 8 月模型的拟合值与实际值进行对比分析,二是将 2013 年 9 月至 2014 年 8 月的数据代入模型进行预测,并将预测值与实际值进行验证比较。

模型拟合值与实际值的对比发现(图 3a),全社会用电量的模型不仅能够模拟用电量的长期变化趋势,还能准确把握用电量的季节和月份变化特征。模型对 2013 年 9 月至 2014 年 8 月的逐月全社会用电量展开预测(图 3b),与实际值相比绝对误差值为 11686 kW·h,相对误差为 5%。可见模型预测能力较强,可以开展未来 1~12 个月的中长期用电量预测。

2.2 业务系统设计及应用

西安市用电量预测气象业务系统在服务器上建立西安市用电量数据库、气象实时标准数据库、用电量预测与校正检验数据库(图 4)。西安市用

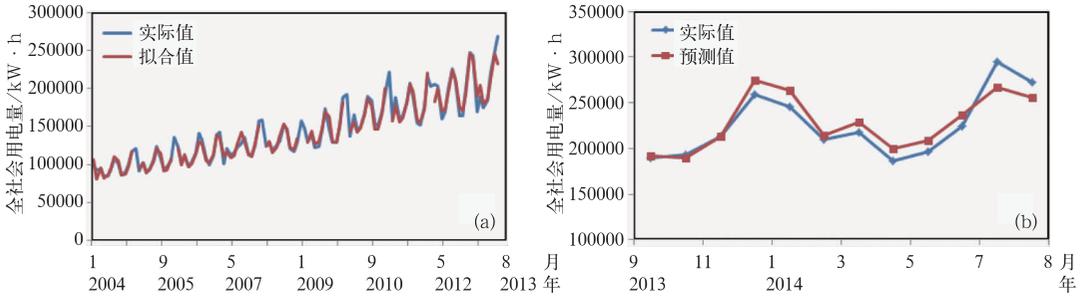


图 3 西安城市用电量实际值与拟合值(a)和预测值(b)对比

Fig. 3 Comparison between historical records and fitted values (a) and predictions (b)

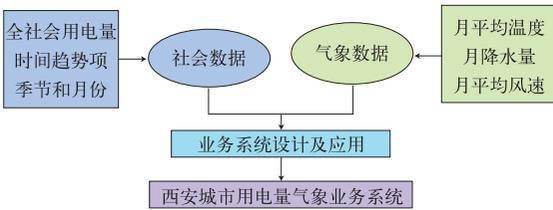


图 4 西安市用电量气象业务系统示意图

Fig. 4 The framework of meteorological service system for electricity consumption prediction in Xi'an City

9—12月的预测值与实际值具有非常好的一致性,耦合效果较好(图6)。业务系统预测值与实际用电量之间的平均误差仅为3.45%,准确率超过95%。此外,考虑到温度是影响用电量最显著的气象因子,本文将2004—2014年月平均温度作为基本参照值

电量数据库存储城市用电量历史数据及相关参数。气象实时标准数据库通过对实时气象数据的调取,转化为模型所需要的标准库。用电量预测与校正检验数据库主要存储模型计算的结果,模型所需要的参数,模型检验数据。

西安市用电量预测气象业务系统针对全社会用电量开展预测分析,具有较好的政策指示意义。业务系统通过调用相关数据通过对模型的数字化、公式化处理,计算出用电量预测数据,实现用电量预测的业务化。

在业务化过程中使用 ASP.NET+SQL 技术设计业务系统,系统采用 B/S 结构。由于模型中考虑了输入较多的气象因子,在业务化系统设计中既要充分考虑系统的可维护性,又要考虑业务人员日常工作化应用的便利,为减少业务人员的工作量,系统模型中大多数数据都直接从内部业务网络中调取,业务人员主要录入气象预测数据和模型检验数据,提高了业务系统的生存性和强健性。

西安城市用电量预测气象业务系统自投入业务使用后,表现出了较好的应用效果。系统首先对2014年9月至2015年11月的全社会用电量进行了预测(图5),根据预测系统数据验证,从2014年



图 5 西安城市用电量预测业务系统

Fig. 5 The operational system for electricity consumption prediction in Xi'an City

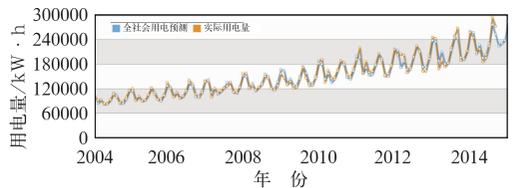


图 6 业务系统预测值与实际值对比曲线

Fig. 6 Comparison between historical records and predictions from January 2004 to December 2014

放入业务系统,对未来 80 个月的全社会用电量进行预测。预测结果数据的连续性、平滑性较好。

3 结论和讨论

3.1 主要结论

本文的研究结果能充分反映西安市用电量的变化特点。全社会用电量表现为春季和秋季用电量的显著减少,以及冬季用电量的显著增加,但由于 2 月春节的影响,用电量又显著减少。工业用电量只受冬季影响显著,2 月春节放假将使工业用电量显著减少 37.38%。城乡居民用电量也表现为春季、秋季显著减少,冬季显著增加,但在包含有春节的 2 月,用电量需求将增加 13.19%。

气温是影响用电量最显著的气象因子,这种影响一方面表现为逐月温度变化的线性影响,另一方面表现为非线性影响,即温度与三类用电量之间都表现为正 U 型的非线性关系。降水与平均风速对用电量影响不够显著,主要是因为本文采用的是月度数据,月平均之后的气象数据会掩盖部分对用电量影响显著的逐日天气变化。

针对全社会用电量建立的模型能准确模拟用电量的季节和月份变化,模型预测值与实际值很接近,能对未来 1~12 个月的用电量展开准确预测,具有良好的预测准确性和实际业务应用前景。

3.2 讨论

西安市工业用电量的变化,尤其是近年来工业用电量的大幅波动变化,更多是由工业生产者决定的。市场需求状况、工业企业数量以及生产要素的价格都构成了工业用电量的影响因素,也是本文所构建模型不适用于工业用电量预测的主要原因。

西安市用电量需求高峰期主要出现在冬季。在冬季,全社会用电量、工业用电量和居民用电量需求增加显著,应注意保障冬季西安城市用电量的需求;需要注意的是,2 月由于春节的因素,全社会用电量和工业用电量大幅减少,而居民用电量显著增加,电力部门可依据三类用电量对 2 月的不同敏感程度,合理调配供电资源。

参考文献

- 段海来,千怀遂. 2009. 广州市城市电力消费对气候变化的响应. 应用气象学报, 20(1):80-87.
- 古扎拉蒂·达摩达尔·N. 2009. 计量经济学基础. 北京:中国人民大学出版社:116-117.
- 郭海明,李文科,王宪富,等. 2006. 神经网络在电力系统负荷预测中的应用. 气象, 32(S1):135-137.
- 胡江林,陈正洪,洪斌,等. 2002. 华中电网日负荷与气象因子的关系. 气象, 28(3):14-18.
- 李兰,陈正洪,洪国平. 2008. 武汉市周年逐日电力指标对气温的非线性响应. 气象, 34(5):26-30.
- 罗慧,巢清尘,李奇,等. 2005. 气象要素在电力负荷预测中的应用. 气象, 31(6):15-18.
- 罗慧,刘杰,巩在武,等. 2012. 西安世园会客流影响及预测的气象计量经济分析. 气象, 38(11):1408-1416.
- 盛琼,朱晓东,骆丽楠,等. 2011. 潮州市用电需求特性及其与气象条件的关系. 大气科学学报, 34(1):122-127.
- 王大鹏. 2013. 灰色预测模型及中长期电力负荷预测应用研究. 武汉:华中科技大学.
- 吴向阳,张海东. 2008. 北京市气温对电力负荷影响的计量经济分析. 应用气象学报, 19(5):531-538.
- 杨大晟,李涛,吴大军,等. 2013. 全社会用电量的优选组合预测法. 电气应用, (24):81-84.
- 杨静,陈冬梅,周庆亮,等. 2010. T213 预报产品在电力负荷预测中的应用. 气象, 36(3):123-127.
- 杨静,郝毅,陈冬梅,等. 2009. 新疆农业区电力负荷与天气的关系. 气象, 35(1):114-118.
- 叶殿秀,张培群,赵珊珊,等. 2013. 北京夏季日最大电力负荷预报模型建立方法探讨. 气候与环境研究, 6(6):804-810.
- 张海东,孙照渤,郑艳,等. 2009. 温度变化对南京城市电力负荷的影响. 大气科学学报, 32(4):536-542.
- 张小玲,王迎春. 2002. 北京夏季用电量与气象条件的关系及预报. 气象, 28(2):17-21.
- 张自银,马京津,雷杨娜. 2011. 北京市夏季电力负荷逐日变率与气象因子关系. 应用气象学报, 22(6):760-765.
- 郑贤,唐伍斌,贝宇,等. 2008. 桂林电网日负荷与气象因素的关系及其预测. 气象, 34(10):96-101.
- 钟利华,李勇,叶殿秀,等. 2008. 综合气象因素对广西电力负荷的影响. 气象, 34(5):31-37.
- Comte D M L, Warren H E. 1981. Modeling the impact of summer temperatures on national electricity consumption. J Appl Meteor, (20):1415-1419.
- Qian H, Yuan S, Sun J, et al. 2004. Relationships between energy consumption and climate change in China. J Geog Sci, 14(1 Sup):87-93.