气温影响空调负荷的累积效应导致能耗的分析

黎灿兵[1]，尚金成[2]，朱守真[3]，杜 力[4]，吴春阳[4]，王清敏[2]

(1. 湖南大学电气与信息工程学院，湖南省长沙市 410082；2. 河南电网电力交易中心，河南省郑州市 450052；
3. 清华大学电机系，北京市 100084；4. 郑州大学电气工程学院，河南省郑州市 450001)

摘要： 大中城市中，空调负荷消耗了大量电能，是电力负荷的重要组成部分。降低空调负荷是节约用电的重点方向，也是需求侧管理的重要方向。空调负荷对气温敏感，且存在明显的累积效应。文中分析了高温季节和低温季节累积效应的基本规律，建立了量化的累积效应后评估模型。通过分析没有累积效应时气温与负荷之间的关系，并与实际情况对比，获得累积效应所导致的电能消耗。对中国北方某市实际数据的分析表明，累积效应所导致的空调能耗巨大，是潜力巨大的节能方向。

关键词： 节能减排；空调负荷；气温；累积效应

0 引言

中国高度重视节能减排工作，电力行业节能减排责任重大，在发电、输变电、配电和用电等环节中均已有较多文献进行了研究[1-7]，从不同方面为电力工业提出了节能减排的途径。从用电方面研究节能减排的文献多侧重于提高用电设备效率、改善需求侧管理水平等。

空调节能是节电的重点方向，有较多文献和专利研究空调的节能，其中采用变频技术是主要方向之一。随着社会、经济的发展，中国大中城市中，空调负荷容量已经占到较大比重，尤其是在夏季高峰负荷时，空调负荷比重高达 30%～50%；部分商业发达的城市，空调负荷已经超过 50%。空调负荷是对气象因素最敏感的负荷种类，因其比重增加，导致电力负荷整体对气象因素的敏感程度不断提高[8-9]。在各项气象因素对负荷的影响中，气温和天气类型(阴、晴等)是对负荷影响最显著的因素。已有较多文献研究了气温对电力负荷的影响。文献[10]研究了不同负荷类型对气温的敏感度；文献[11-12]研究了针对气象因素的短期负荷预测修正模型；文献[13]提出了考虑气温敏感负荷的模糊线性回归和指数平滑综合方法；文献[14]提出了人体舒适度、空调指数等概念，分析空调负荷的变化规律；文献[15]提出了气温影响电力负荷的累积效应，即一日高温可对连续多日的电力空调负荷产生比较显著的影响，并提出了考虑累积效应的负荷预测模型。

在全球变暖的背景下，研究气温对电力负荷的影响规律更具重大意义。如在夏季，高温导致更多的电力消耗，而更多的电力消耗会导致更多的废热和温室气体排放，形成正反馈恶性循环。在气温和电力负荷的正反馈作用中，由于存在累积效应，导致空调负荷持续攀高。准确把握累积效应，有利于提出针对性较强、效果显著的节能减排措施。

预测中考虑累积效应与累积效应后评估有较大不同。在后评估中，可以排除预测模型中存在的较多的不确定性。如气象预测可能存在偏差，后评估中可以采用实际数据；后评估模型中，可掌握一些对负荷影响较大的重大活动、重点企业的负荷情况。因此，累积效应的后评估模型与预测中考虑累积效应有较大不同。

本文从节能的角度，建立比预测模型更准确的累积效应导致的电能消耗的后评估模型，量化评估累积效应导致的电能消耗，为制定节能减排措施提供依据。

1 累积效应的成因与表现形式简析

夏季累积效应的成因，大致包括如下 2 个方面：①人体对气温的感知具有惯性[15]；②热量累积。

市区人口密度大，下垫面人为改造程度大，温室气体与废热排放量大，热量容易在市区累积，在连续高温的情况下，导致市区空调负荷攀升。

文献[15]分析了夏季的累积效应，事实上，冬季也存在累积效应，连续低温导致取暖负荷攀升，其主要原因是人体的感知惯性。考察低温季节的累积效应时，日最低气温是主要的考察指标。表 1 为国内某北方城市部分数据。

从表 1 可看到冬季累积效应的存在，如 2008 年 2 月 13 日(工作日)，最低气温较前一日略有上升，

收稿日期：2010-03-15；修回日期：2010-07-09。

但负荷仍有明显提高。不过,该市是北方城市,采用集中供暖,因此,冬季累积效应不如夏季明显。

表 1 低温季节的累积效应
Table 1 Accumulative effect in winter

日期	星期	日最低气温/(℃)	日平均负荷/MW
2008-02-11	一	−5	2 663.958
2008-02-12	二	−7	2 753.582
2008-02-13	三	−6	2 953.855
2008-02-14	四	−2	2 991.566
2008-02-15	五	−3	3 036.122

2 累积效应的后评估方法

累积效应影响电力负荷,在夏季,累积效应导致等效气温比实际气温高;在冬季,累积效应导致等效气温比实际气温低。在累积效应的预测模型中,只能对预测气温进行等效修正;修正后,用以挑选合适的相似日;由于影响负荷的因素很多,在预测中还不能获得累积效应所导致的负荷变化。在累积效应的后评估过程中,由于各项影响负荷的因素均已经明确,不但可以评估等效气温及累积效应强度,还可以评估累积效应导致的能耗。

夏季累积效应的量化评估步骤如下:

1)挑选没有累积效应的日期。没有累积效应的日期包括:①当天气温很低,空调负荷基本不开启,因此不受累积效应的影响(夏季累积效应分析时,气温指日最高气温;冬季累积效应分析时,气温指日最低气温;下同);②当天气温很高,空调负荷基本已经全部开启,因此不受累积效应的影响;③前若干日气温较低,认为对当天没有影响。

2)根据没有累积效应的日期,再考虑工作日、周末、节假日的区别,拟合没有累积效应的情况下气温 t 和负荷 L 的关系,$L=f(t)$。

除了气温外,还有很多因素影响电力负荷,为了保证分析的准确性,需要因地制宜地尽可能排除或者降低其他因素的影响。因此,在这一步中,工作日和周末应分别分析,排除有特殊情况的日期,如高考考试日期、7 月 1 日(一般有重大活动)、有降雨的日期等。另外,考虑不同日类型的影响,对负荷需要进行适当的修正(考虑星期一至星期五的周期性负荷变化)。

夏季,气温是影响负荷变化的主导因素,相对而言,其他因素的影响小得多,而且,在评估中,有些日期累积效应的影响是正偏差,有些日期的影响是负偏差,对多日进行评估,偏差应可以基本抵消,整体而言评估结果是可信的。

在夏季,气温与负荷的关系大致可以用一个 S 形曲线拟合。一方面,当气温高到一定程度时,空调负荷已经饱和,负荷对气温的敏感程度下降;另一方面,当气温低到一定程度时,空调负荷基本关闭,负荷对气温的敏感程度也下降。在中间一个区域,负荷对气温相当敏感。

考虑到存在累积效应的温度区间并不大(数摄氏度),且温度与负荷的关系可以认为是连续的光滑函数,通过对大量负荷数据的观察,得到了反映温度与负荷之间关系的经验公式。

设气温对负荷有一定影响的门槛气温为 t_0,饱和气温为 t_1,负荷对气温最敏感的气温为 t_m,则可用一个分段二次函数来拟合气温和负荷之间的关系,如下:

$$L=f(t)=\begin{cases} f_1(t) & t\in[t_0,t_m] \\ f_2(t) & t\in(t_m,t_1] \end{cases}=$$
$$\begin{cases} a_1(t-t_0)^2+b_1(t-t_0)+c_1 & t\in[t_0,t_m] \\ a_2(t_1-t)^2+b_2(t_1-t)+c_2 & t\in(t_m,t_1] \end{cases} \quad (1)$$

式中:$a_i,b_i,c_i(i=1,2)$为常数。

考虑到 f 是连续函数,有

$$f_1(t_m)=\lim_{t\to t_m} f_2(t) \quad (2)$$

3)将存在累积效应的各日的实际负荷 L_d,根据式(1)中拟合所得的气温与负荷的关系,求得各日的等效气温如下:

$$t_d'=f^{-1}(L_d) \quad (3)$$

式中:t_d'为该日的等效气温。

4)定义累积效应强度如下:

$$A_d=t_d'-t_d \quad (4)$$

式中:A_d 为第 d 日的累积效应强度;t_d 为该日的实际气温。

例如:某日的实际最高气温为 34 ℃,考虑累积效应后,等效气温可能为 35.5 ℃,其中 1.5 ℃定义为累积效应强度。

式(4)是对夏季累积效应强度的定义;在冬季,累积效应使等效气温低于实际气温,因此,定义累积效应强度时需要取负号。

采用上述方法,可评估各日的等效气温,根据实际气温与等效气温的差距,可对各日由累积效应导致的能耗进行后评估,如下:

$$A_E=h\sum_{d=1}^{D}(L_d-f(t_d)) \quad (5)$$

式中:A_E 为累积效应导致的能耗;D 为天数;$f(t_d)$ 为该日若没有累积效应,实际气温所对应的负荷;h 为所分析时间范围的小时数。

采用式(5),可以量化评估累积效应所导致的电能消耗,并分析可能的节能空间。

3　算例分析

利用第 2 节所提出的方法，对中国北方某市气温实际数据进行分析。

根据常识以及对该市历史数据的统计分析，日最高气温低于 24 ℃时，可认为空调负荷已经关闭，气温对负荷的影响不明显；气温高于 38 ℃时，可认为空调负荷已经基本全部开启，负荷已经饱和。因此，t_0 取 24 ℃，t_1 取 38 ℃，t_m 取 t_0 和 t_1 的中间值 31 ℃。

根据社会生产和生活规律可知，在休息日（星期六、星期日），电力负荷普遍比工作日低，所以一般情况下，在星期一时，即使气温降低，当天负荷仍会高于休息日，此种情况不应归为由于气温累积效应引起的，而主要是由生产、生活规律造成的。因此，在分析是否存在累积效应时，应将工作日和休息日分开进行分析。本例中，只分析工作日。

从该市挑选出来的可不考虑累积效应的工作日如表 2 所示。

表 2　某市可不考虑累积效应的工作日及负荷
Table 2　Non-accumulative effect days and load data in a city

日期	星期	最高气温/(℃)	前一日最高气温/(℃)	日平均负荷/MW
2007-06-13	三	30	32	2 963.144
2007-06-14	四	31	30	2 991.319
2007-06-15	五	31	31	3 053.432
2007-07-10	二	34	29	3 339.224
2007-07-11	三	34	34	3 315.448
2007-07-12	四	32	34	3 298.085
2007-07-13	五	31	32	3 232.888
2007-08-01	三	32	31	3 407.632
2007-08-03	五	31	30	3 228.179
2007-08-21	二	35	35	3 836.273
2007-08-22	三	33	35	3 719.769
2007-08-23	四	33	33	3 553.909
2007-08-24	五	33	33	3 593.707
2007-08-28	二	29	28	3 092.702
2007-08-29	三	30	29	3 094.193
2007-08-30	四	31	30	3 171.895

根据式(1)和式(2)，拟合得到各项系数，如表 3 所示。

表 3　拟合系数
Table 3　Fitting coefficients

i	a_i	b_i	c_i
1	28.378	−212.874	3 239.178
2	−18.680	55.363	3 677.245

若干典型工作日由累积效应导致的能耗情况如表 4 所示。从表 4 可以看出，在上述日期，在该市累积效应合计导致了 23 304 MW·h 的电能消耗，这是一个巨大的数字，显示从控制累积效应的角度研究节能措施，节能潜力较大。

表 4　累积效应导致的能耗评估
Table 4　Energy consumption caused by accumulative effect

日期	实际气温/(℃)	等效气温/(℃)	实际负荷/MW	$f(t_d)$	累积效应导致的能耗/MW
2007-06-18	29	31	3 085	2 884	201
2007-06-29	29	32	3 240	2 884	356
2007-07-03	31	32	3 256	3 149	107
2007-07-06	32	35	3 644	3 337	307

4　结语

本文研究了气温对电力负荷的影响中存在的累积效应，提出了冬季也存在累积效应现象；建立了分析累积效应所导致的空调能耗的后评估模型，并根据实际数据进行了分析，提出了分析影响累积效应强度的基本方法。实例表明，累积效应导致了大量的空调能耗。

累积效应绝大部分情况下是和城市热岛效应综合作用的。如某市某日郊区某处 30 ℃，市区某处 33.5 ℃；次日郊区 28 ℃，市区 31 ℃；郊区不是连续高温的情况，但在城市热岛效应的作用下，市区属于连续高温状态，从而存在比较明显的累积效应。累积效应和城市热岛效应的综合作用，导致了大量的空调能耗。累积效应的主要成因是人体的一种感觉，不是直接可控的因素；但城市热岛效应是可控的。通过削弱城市热岛效应的影响，可以间接降低累积效应的影响。建议后续研究从累积效应和城市热岛效应的综合作用规律入手，从改善环境角度研究节能减排，可望取得显著效果。根据对累积效应的分析，可为节能减排提供支持，根据量化累积效应所导致的电能消耗，对下一步开展有针对性的节能措施研究具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 尚金成. 电力节能减排的理论体系与技术支撑体系. 电力系统自动化，2009，33(6)：31-35.
SHANG Jincheng. Theoretical system and technical supporting system for energy-saving and emission-reducing of electric power system. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 31-35.

[2] 陈启鑫，康重庆，夏清. 电力行业低碳化的关键要素分析及其对电源规划的影响. 电力系统自动化，2009，33(15)：18-23.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Key low-carbon factors in the evolution of power decarbonisation and their impacts on generation expansion planning. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 18-23.

[3] 魏学好,李瑞庆,陈宇晨.具有节能减排内核的电力市场新模式.电力系统自动化,2009,33(15):24-28,106.
WEI Xuehao, LI Ruiqing, CHEN Yuchen. A new electricity power market model embedding core function of energy-saving and emission-reduction. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 24-28, 106.

[4] 耿建,高宗和,张显,等.节能电力市场设计初探.电力系统自动化,2007,31(19):18-21.
GENG Jian, GAO Zonghe, ZHANG Xian, et al. A preliminary investigation on power market design considering social energy efficiency. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 18-21.

[5] 傅书遏,王海宁.关于节能减排与电力市场的结合.电力系统自动化,2008,32(6):31-34,75.
FU Shuti, WANG Haining. On coordination of energy saving and reduction of pollution policy with electricity market reform in China. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 31-34, 75.

[6] 施建华,谭素梅.节能发电调度发电计划编制算法.电力系统自动化,2008,32(24):48-51.
SHI Jianhua, TAN Sumei. Algorithm of energy saving generation dispatch scheduling. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 48-51.

[7] 李扬,葛乐,林一.电力市场下计及节能环保的实时发电调度策略.电力自动化设备,2009,29(3):42-45.
LI Yang, GE Le, LIN Yi. Real-time power dispatch strategy considering energy saving and environmental protection. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3): 42-45.

[8] 郑竞宏,朱守真,王光,等.空调负荷运行特性研究及建模.中国电机工程学报,2009,29(10):67-73.
ZHENG Jinghong, ZHU Shouzhen, WANG Guang, et al. Key characteristics and modeling of air conditioner load. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 67-73.

[9] FAN S, CHEN L, LEE W J. Short-term load forecasting using comprehensive combination based on multimeteorological information. IEEE Trans on Industry Applications, 2009, 45(4): 1460-1466.

[10] 王治华,杨晓梅,李扬,等.气温与典型季节电力负荷关系的研究.电力自动化设备,2002,22(3):16-18.
WANG Zhihua, YANG Xiaomei, LI Yang, et al. Study on relationship between temperature and electrical loads in typical seasons. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(3): 16-18.

[11] 王鹏,邰能灵,王波,等.针对气象因素的短期负荷预测修正方法.电力系统自动化,2008,32(13):92-96.
WANG Peng, TAI Nengling, WANG Bo, et al. A short-term load forecasting correction method considering climatic factors. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 92-96.

[12] CHOW T W S, LEUNG C T. Neural network based short-term load forecasting using weather compensation. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1736-1742.

[13] KYUNG B S, SEONG K H, JUNG W P, et al. Hybrid load forecasting method with analysis of temperature sensitivities. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(2): 869-876.

[14] CHU C M, JONG T L, HUANG Y W. A direct load control of air-conditioning loads with thermal comfort control// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 12-16, 2005, San Francisco, CA, USA.

[15] 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.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. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(9): 96-99.

黎灿兵(1979—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:电力负荷预测、规划、信息化与新能源。E-mail: lcb186@163.com

尚金成(1966—),男,博士,主要研究方向:电力市场、电力系统优化调度。E-mail: shangjincheng@gmail.com

朱守真(1950—),女,教授,主要研究方向:电力系统建模、参数辨识、大型发电机组安全监控、电压稳定、电能质量监控和评估。

An Analysis of Energy Consumption Caused by Air Temperature-affected Accumulative Effect of the Air Conditioning Load

LI Canbing[1], *SHANG Jincheng*[2], *ZHU Shouzhen*[3], *DU Li*[4], *WU Chunyang*[4], *WANG Qingmin*[2]

(1. Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Henan Grid Power Exchange Center, Zhengzhou 450052, China; 3. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In large cities, the air conditioning load is an important component of power load. The air conditioning load consumes large amounts of electrical energy. The reduction in the air conditioning load is not only the crucial direction of electricity-saving, but also an important direction of demand side management. The air conditioning load is sensitive to air temperature, and there obviously exists the accumulative effect. The accumulative effects of high temperature and low temperature seasons are studied. A mathematical model for quantitative post-assessment of the accumulative effect is proposed. By an analysis of the relationship between air temperature and power load on the days without accumulative effect and a comparison with the actual situation, the electric energy consumption due to the accumulative effect can be obtained. The case study data on a city in North China shows that the energy consumption of air conditioning due to the accumulative effect is great, which is a tremendous potential direction of energy-saving.

Key words: energy-saving and emission reduction; air conditioning load; air temperature; accumulative effect