

基于层次分析和模糊聚类的高度城市化区域中长期负荷预测研究

随着经济发展步入“新常态”和城市化进程拐点的到来，高度城市化区域的负荷增长开始丧失“单边上扬”的特性，而呈现明显的波动性，这使得基于传统方法的中长期负荷预测难以为继。提出一种依托城市化特性分析的负荷预测模型。首先就高度城市化区域在人口、产业和布局等三方面的特征展开剖析，提取城市化对负荷变化趋势的主要作用因素；其次以层次分析法作为糅合专家经验的手段，实现对各作用因素重要性的主观赋权；再次引入模糊聚类分析，寻找经赋权处理的各样本相似度，以此达成预测建模；最后进行算例佐证。所提模型既能充分汇聚专家知识，又可深度挖掘历史数据中蕴含的有效信息，同时兼顾不确定因素的影响，比较适合“新常态”下高度城市化区域的中长期负荷预测。算例结果表明，所提方法较常规方法有显著的准确度优势。

杨 军/国网浙江台州市路桥区供电公司

0 引言

随着产业结构调整和经济增长步入“新常态”，我国社会发展呈现一种明显的阶段性特征^[1]。在这种大背景下，很多大城市（尤其是城市化进程走在前列的地方）的人口、产业以及布局等城市化进程相关元素出现新变化，使得其用电负荷不再呈“单边上扬”式的快速增长趋势，而展现为某种类似饱和的波动特性^[2]。这给高度城市化区域的负荷中长期预测增加了难度。由于城市化是一个繁杂体系，牵涉要素众多，各要素在相互耦合的基础上对电力负荷造成影响，因此，要改善高度城市化区域负荷预测准确度，必须全面、细致地梳理各类城市化进程要素，并依托科学的数学模型解析其对电力负荷的作用机制，最后予

以合成考量。

传统的负荷中长期预测方法体系如图1所示^[3]。

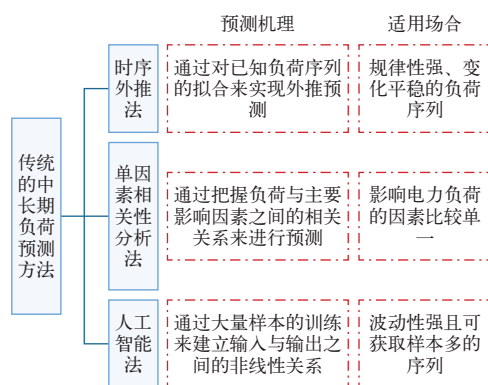


图1 传统的负荷中长期预测方法体系

由图1可知：由于高度城市化区域的负荷存在波动性强、关联因素复杂以及历史样本不多等特点，传统的中长期负荷预测方法不具备较强的可操作性。

随着技术的进步，针对城市化区域的中长期负荷预测方法有所更新。如文献[4]从物元分析角度建立负荷归类体系，并在此基础上统筹城市化因素对负荷的影响；文献[5]基于数据挖掘理念，通过对经济指标深度分析来间接预测电力负荷；文献[6]梳理了城市化与配电网发展的相互关系，但未进行负荷预测层面的扩展应用。

综上，关于高度城市化区域的中长期负荷预测工作有一定研究基础，但尚存在较大研究空间。本文将充分考虑中长期负荷预测中的确定性与不确定性，建立基于层次分析和模糊聚类的新型预测方法。



杨 军/高级工程师

关键词/Keywords

负荷预测 ·
层次分析 ·
模糊聚类 ·
高度城市化区域 ·

1 基本思路

高度城市化区域的负荷变化总体呈现波动趋势，主要由该类区域的人口特性、产业配置和空间布局等三大层面的因素交织作用所致^[7]。

1) 人口特性。高度城市化区域的居住人口往往呈现饱和态，这使气温等随机因素成为主导居民用电变化的关键推手，而随机因素是波动的^[8]，其作用下的负荷必然以波动为主。

2) 产业配置。高度城市化区域的产业必然以非农业为主，其中传统重工业占比会逐步削减（环保因素），而新兴工业以及第三产业会获得优先发展。因此，各产业的用电负荷是一种此消彼长态势，表现到总负荷上则为明显波动性^[9]。

3) 空间布局。高度城市化区域因为已经历长时间发展，空间布局基本完善和成熟^[10]，使得区域性负荷不可能出现大的跃变。

高度城市化区域的三大因素对负荷的影响如图2所示。

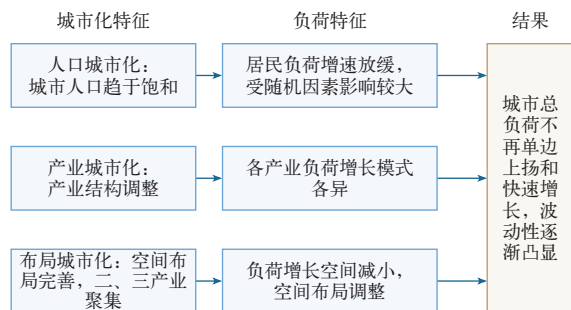


图2 高度城市化区域的三大因素对负荷的影响

人口、产业和布局涵盖了城市化进程的核心内容^[11]，其下各包含若干分级要素（不同城市在这方面会有所区别）。对这些要素进行提炼，然后依托层次分析法，充分融合专家经验，得到各要素对负荷影响的权重配置，再引入模糊聚类对经权重处理后的样本数据进行聚类比较，以此获取预测值。以上就是进行本研究的基本思路。

图3为以我国东部A市为例而提炼的城市化要素体系（对负荷变动有影响），图4为依据基本思路而勾画的高度城市化区域中长期负荷预测流程。

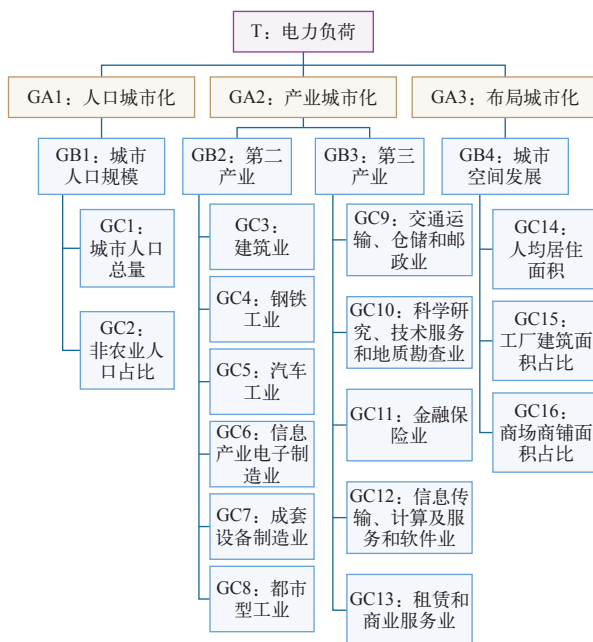


图3 以东部某大城市为例的对负荷有影响的城市化要素提炼

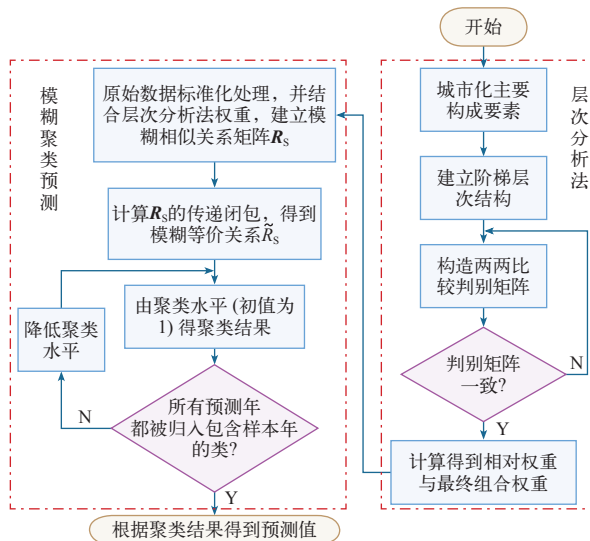


图4 高度城市化区域中长期负荷预测流程

2 基于层次分析法的要素权重计算

层次分析法（Analytic Hierarchy Process, AHP）的定义为^[12]：将复杂问题分解为各个组成因素，又将这些因素按支配关系分组成阶梯层次结构，通过比较的方式确定层次中各因素的相对重要性，然后得到组合权重。显然，将层次分析法用于分析城市化各要素对电力负荷的影响大小是非常合适的。具体步骤如下：

1) 确立层次结构。图3中, T为总目标; GA、GB和GC为自上至下的三个准则层。

2) 设计两两比较判别矩阵。引入一定数量的专家, 对同一梯级中各因素两两间相对重要性进行评价遍历^[13]。如某层共 n 个元素, 用 b_{ij} 表示该层中元素 c_i 对元素 c_j 的重要程度之比。关于 b_{ij} 取值, 实际牵涉到的是AHP方法中的标度问题。当前已经发展出的AHP标度方法有0~2三标度法、-2~2五标度法、1~9标度法、9/9~9/1分数标度法、 $9^{0/9} \sim 9^{9/9}$ 指数标度法和 $e^{0/4} \sim e^{8/4}$ 指数标度法等。其中, 1~9标度法在保序性、标度均匀性、标度值可记忆性以及标度值可感知性等层面均较其他方法优秀, 且应用面最为广泛, 因此, 本文选用1~9标度法来作为 b_{ij} 的取值参照, 如表1所示。

表1 基于1~9标度的元素重要性比值取值及含义

b_{ij}	含义
1	c_i 与 c_j 一样重要
3	c_i 比 c_j 有点重要
5	c_i 比 c_j 显著重要
7	c_i 比 c_j 高度重要
9	c_i 比 c_j 极端重要
2, 4, 6, 8	上述两相邻判断的中值
倒数	若因素 i 和因素 j 的比较判断值为 b_{ij} , 则因素 j 和因素 i 的重要性之比为 $b_{ji} = 1/b_{ij}$

就图3来说, 最终可形成的判别矩阵为6个, 即 $G_{T-GA(1-3)}$ 、 $G_{GB1-GC(1-2)}$ 、 $G_{GA2-GB(2-3)}$ 、 $G_{GB2-GC(3-8)}$ 、 $G_{GB3-GC(9-13)}$ 和 $G_{GB4-GC(14-16)}$ 。 $G_{T-GA(1-3)}$ 的意思是GA1、GA2、GA3对于T的重要性经两两比对所形成的判别矩阵, 其余类推。

3) 对判别矩阵作一致性检查^[14], 并计算有关权重, 即

$$\begin{cases} CR = \frac{CI}{RI} \\ CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, CR为矩阵一致性比率指标; CI为一致性指标; RI为随机一致性指标(其值由判别矩阵的维数唯一决定, 可通过查表获取); $\lambda_{\max}$ 为判别矩阵最大特征根; n 为判别矩阵维数。

当 $CR < 0.1$ 时, 判别矩阵的一致性属于可接受^[15], 则 $\lambda_{\max}$ 对应的归一化特征向量视为该层次各元素重要性(指对上一层元素而言)的排序向量。在获得每一层级每一元素的相对权重后, 按隶属关系进行向上叠乘, 即可得到某具体元素对于目标层的最终权重值。

3 基于模糊聚类分析的负荷预测建模

与短期或超短期负荷预测相比, 中长期负荷预测所受的不确定因素更为多样, 因此所呈现出来的模糊性也更为明显^[16]。模糊聚类分析通过比较不同对象之间的相似度来实现聚类, 可充分吸取样本中的中介性因素, 从而较好地处理真实世界对象的“亦此亦彼”情形^[17]。

对于高度城市化区域, 其不同年份负荷变化的根源不外乎各类因素的共同驱动(类似于系统动力学范畴)。这些因素与负荷之间形成某种稳定的架构。显然, 要得到准确的架构方程是比较困难的, 但可以将其视为“黑盒子”。对于“黑盒子”而言, 如输入量是相近的, 其输出也必然相近。因此, 可以对各因素的变化情况按年进行聚类, 以此间接获知预测目标年与某个或某些历史年份在“黑盒子”输入上的相近性, 这样就可利用历史年份的负荷变化数值(相当于黑盒子输出)来产生目标年的负荷变化幅值。以上就是本项研究中按年份进行动态聚类的考虑和物理意义。

下面就模糊聚类法中综合性能佳的基于等价关系的模糊聚类分析法在高度城市化区域中长期负荷预测的建模应用进行展开。

(1) 原始数据标准化

设原始数据矩阵为 $A = (x_{ij})_{n \times s}$, 其中 s 指样本数量, n 指影响因素个数。所谓标准化处理, 就是将不同因素的量纲与大小的差异进行抹平。

1) 计算各维因素的平均值及方差, 即

$$\begin{aligned} \bar{x}_k &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ S_k^2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

2) 粗略标准化

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{S_k} \quad (3)$$

3) 深层标准化

$$x''_{ik} = \frac{x'_{ik} - x'_{k\min}}{x'_{k\max} - x'_{k\min}} \quad (4)$$

式中, $x'_{k\max}$ 和 $x'_{k\min}$ 分别为序列 $\{x'_{1k}, x'_{2k}, \dots, x'_{nk}\}$ 的最大值及最小值。

(2) 建立模糊相似关系矩阵

以数量积形式, 吸纳各要素权值 (权值计算见上小节的层次分析法), 获得样本间的相似度 r_{ij} , 即

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^s \omega_k x_{ik} \omega_k x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^s (\omega_k x_{ik})^2 \sum_{k=1}^s (\omega_k x_{jk})^2}} \quad (5)$$

式中, ω_k 为要素 k 的权重; 满足 $\sum_{k=1}^s \omega_k = 1$ 。在获取各 r_{ij} 后, 就能建立起模糊相似关系矩阵 $R_s = (r_{ij})_{s \times s}$ 。

(3) 计算 R_s 的传递闭包 $\tilde{R}_s$

传递闭包指定义在集合上的二元关系的最小传

递关系^[18]。为求取 $\tilde{R}_s$, 按式 (6) 作合成运算, 即

$$R_s^2 = R_s \circ R_s, \quad R_s^4 = R_s^2 \circ R_s^2, \quad \dots \quad (6)$$

符号 “ $\circ$ ” 的定义如式 (7) 所示, 其中 c_{ij} 为 $C_{m \times n}$ 元素, “ $\vee$ ” 表示取大, “ $\wedge$ ” 表示取小。

$$\begin{cases} C_{m \times n} = A_{m \times s} \circ B_{s \times n} \\ c_{ij} = \vee \{a_{ik} \wedge b_{kj} | 1 \leq k \leq s\} \end{cases} \quad (7)$$

在系列合成运算过程中, 必存在 l (正整数), 使 $R_s^{2l} = R_s^l \circ R_s^l$ 成立, 此时取 $\tilde{R}_s = R_s^l$ 。

4 算例

仍以我国东部 A 市为例, 结合图 3 搜集其 2002~2015 年相关数据, 然后以 2002 年为基准年, 将数据处理为相对于上年的增长率形式, 如表 2 所示 (表中各因素的含义参照图 3)。目标是: 根据可获取数据样本, 利用本文建立的“层次分析+模糊聚类”预测模型, 对 2012~2015 年的负荷增长作虚拟预测, 并与实际状况作比对, 以验证模型的有效程度。

1) 首先运用层次分析法将专家经验进行科学导入, 得到各城市化要素对用电量影响的主观赋

表2 A市2003~2015年期间各城市化要素的增长情况

(单位: %)

年份	GC1	GC2	GC3	GC4	GC5	GC6	GC7	GC8	GC9	GC10	GC11	GC12	GC13	GC14	GC15	GC16
2003	2.68	1.46	12.59	-14.22	30.20	28.84	13.62	26.89	7.18	10.23	-5.70	21.89	22.75	4.80	-5.81	12.27
2004	3.08	1.57	45.43	36.94	44.52	68.93	44.28	8.66	4.29	5.33	6.85	17.71	5.82	5.34	15.84	11.61
2005	3.91	4.64	44.20	32.83	-8.24	43.53	36.34	11.64	60.94	131.2	-1.97	32.99	206.2	5.79	0.98	5.30
2006	3.01	4.06	9.56	26.65	-17.87	26.06	22.84	21.19	18.03	23.92	10.23	18.22	15.36	2.05	1.41	4.81
2007	3.91	1.54	20.97	7.85	42.46	14.31	29.14	7.65	14.83	9.96	22.23	17.29	13.96	2.01	5.26	6.76
2008	5.06	1.16	10.45	11.41	23.60	25.95	23.32	14.73	8.09	15.21	46.52	18.83	42.74	1.97	2.71	-0.16
2009	3.73	0.81	28.59	1.81	2.42	6.68	24.88	18.99	-1.40	21.23	16.96	12.37	28.38	2.58	-1.78	-0.23
2010	3.25	0.91	18.02	-21.35	38.65	-8.64	0.05	-9.41	-9.98	11.58	27.58	6.96	5.21	3.14	0.97	8.55
2011	4.18	0.68	12.26	33.66	41.28	25.44	14.29	17.28	31.40	7.23	8.13	12.34	20.90	1.83	2.87	0.79
2012	1.94	0.45	6.65	5.24	13.87	2.05	11.57	4.44	4.06	14.24	16.73	16.09	17.58	1.80	-0.99	-1.86
2013	1.40	0.56	5.61	-14.61	4.05	-5.74	-2.97	4.34	3.11	12.70	7.59	17.08	16.76	1.76	7.89	-3.53
2014	1.46	0.22	5.35	-2.02	13.67	-3.98	-1.59	1.18	4.44	13.08	15.22	12.82	16.58	1.15	-1.45	0.17
2015	0.44	0.33	7.77	-2.70	8.91	-3.61	6.36	6.78	15.19	9.51	15.77	12.91	11.86	1.71	-2.57	2.34

权, 如表 3 所示。

由表 3 可知: 各判别矩阵的 CR 均小于 0.1, 且均可通过一致性检验, 因此其 $\lambda_{\max}$ 对应的归一化特征向量可以视为该判别矩阵对应的要素层次

的各层内要素的权重分配。在获取各层要素相对于自身层次的权重后, 按隶属关系向上叠乘, 就可得到各要素对总的要素体系的权重值, 如表 4 所示。

表3 各要素在自身所在层次的权重值

判别矩阵	CI	RI	CR	$\lambda_{\max}$ 对应的特征向量(经归一化)
$G_{T-GA(1-3)}$	0.003 5	0.57	0.006 1	$(0.234\ 1, 0.615\ 5, 0.150\ 4)^T$
$G_{GB1-GC(1-2)}$	0	0	0	$(0.250\ 3, 0.749\ 7)^T$
$G_{GA2-GB(2-3)}$	0	0	0	$(0.400\ 0, 0.600\ 0)^T$
$G_{GB2-GC(3-8)}$	0.023 2	1.26	0.018 4	$(0.089\ 5, 0.160\ 7, 0.216\ 6, 0.299\ 3, 0.125\ 0, 0.109\ 5)^T$
$G_{GB3-GC(9-13)}$	0.006 9	1.08	0.006 3	$(0.158\ 6, 0.153\ 1, 0.328\ 1, 0.152\ 9, 0.206\ 9)^T$
$G_{GB4-GC(14-16)}$	0.000 8	0.55	0.001 4	$(0.221\ 6, 0.319\ 0, 0.460\ 0)^T$

表4 各要素在整个要素体系中的最终权重

要素	权重	要素	权重
GC1	0.058 6	GC9	0.058 6
GC2	0.175 5	GC10	0.056 5
GC3	0.022 0	GC11	0.121 2
GC4	0.039 6	GC12	0.056 5
GC5	0.053 3	GC13	0.076 4
GC6	0.073 7	GC14	0.033 3
GC7	0.031 3	GC15	0.048 0
GC8	0.026 9	GC16	0.069 2

对表2数据作标准化处理，结合表4内容，计算得到模糊相似关系传递闭包矩阵，如表5所示。该矩阵中，数值越接近1，表明该数值所对应的两个年份的聚类效果越好。

表5对应的动态聚类图如图5所示。图5中数字含义：当聚类水平降至该值时，数字左边的对象

可聚为一类。因此，欲对2012~2015年作虚拟预测，可通过以下方法：寻找与这些年份同属一类的历史年份→对历史年份的负荷增长率进行计算和处理→得到待测年份的负荷增长水平。如在聚类水平0.93下，2012、2014年和2008、2009年为一类；在聚类水平0.92下，2013、2015年和2010年为一类；因此可通过获取2008~2010年的负荷增长来虚拟推算2012~2015年的负荷情况。历年增长实绩如表6所示。

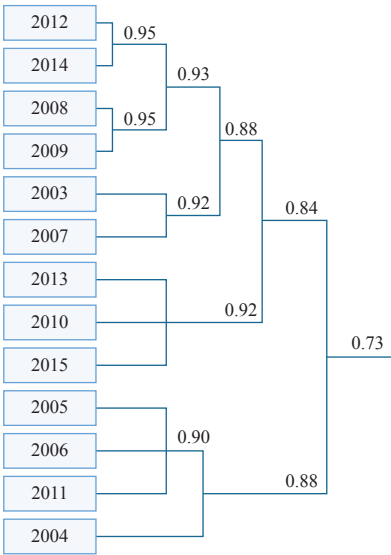


图5 动态聚类图

表5 模糊相似关系矩阵

年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
2003	1.000 0	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.926 1	0.889 8	0.889 8	0.843 8	0.735 4	0.889 8	0.843 8	0.889 8	0.843 8
2004	0.735 4	1.000 0	0.882 7	0.882 7	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.882 7	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4
2005	0.735 4	0.882 7	1.000 0	0.905 6	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.905 6	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4
2006	0.735 4	0.882 7	0.905 6	1.000 0	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.905 6	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4
2007	0.926 1	0.735 4	0.735 4	0.735 4	1.000 0	0.889 8	0.889 8	0.843 8	0.735 4	0.889 8	0.843 8	0.889 8	0.843 8
2008	0.889 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.889 8	1.000 0	0.950 3	0.843 8	0.735 4	0.931 6	0.843 8	0.931 6	0.843 8
2009	0.889 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.889 8	0.950 3	1.000 0	0.843 8	0.735 4	0.931 6	0.843 8	0.931 6	0.843 8
2010	0.843 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.843 8	0.843 8	0.843 8	1.000 0	0.735 4	0.843 8	0.922 6	0.843 8	0.926 1
2011	0.735 4	0.882 7	0.905 6	0.905 6	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.735 4	1.000 0	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.843 8
2012	0.889 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.889 8	0.931 6	0.931 6	0.843 8	0.735 4	1.000 0	0.843 8	0.955 8	0.735 4
2013	0.843 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.843 8	0.843 8	0.843 8	0.922 6	0.735 4	0.843 8	1.000 0	0.843 8	0.926 1
2014	0.889 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.889 8	0.931 6	0.931 6	0.843 8	0.735 4	0.955 8	0.843 8	1.000 0	0.843 8
2015	0.843 8	0.735 4	0.735 4	0.735 4	0.843 8	0.843 8	0.843 8	0.926 1	0.843 8	0.735 4	0.926 1	0.843 8	1.000 0

表6 A市2003~2015年的负荷增长的实际数据

年份/年	负荷增长(%)	年份/年	负荷增长(%)
2003	8.891 1	2010	1.331 1
2004	15.526 9	2011	12.354 4
2005	10.121 3	2012	3.376 6
2006	12.232 1	2013	1.032 2
2007	7.394 9	2014	4.222 8
2008	8.304 4	2015	-2.947 1
2009	6.139 1		

文献[19]指出：中长期跨度的负荷序列符合“近大远小”特征，即在相关条件一致的情况下，越靠近预测年的样本年的数据对预测结果影响越大。文献[20]指出：依据“近大远小”原则赋权值时，近期数据的权重应选得大些，远期数据的权重应选得小些。因此，在模糊聚类后，若多个样本年共同指向一个预测年，则先对样本年数据赋权（如2008、2009年共同指向2012年，则可将2009年数据赋权0.6、2008年数据赋权0.4），然后以加权平均的方式将样本年数据合成以服务于预测工作。表7给出了本文所提方法与其他几种常用方法的预测比对（针对相同样本）。

表7 几类预测方法关于2012~2015年负荷增长率预测的预测准确度比对

年份/年	实际增长 (%)	本文方法 (%)	GM(1, 1)法 (%)	GDP弹性系数法 (%)
2012	3.376 6	7.005 2	9.786 5	8.223 8
2013	1.032 2	1.331 1	8.765 4	6.398 7
2014	4.222 8	7.005 2	7.234 3	6.123 2
2015	-2.947 1	1.331 1	6.112 1	4.229 9
平均预测误差		2.747	6.553 4	4.822 8

从比较结果可以看出：①灰色GM(1, 1)模型的预测准确度最差，这是由于GM(1, 1)虽然适用贫信息预测，但其基于外推原理，而高度城市化区域的负荷序列呈明显波动性，因此外推失效；②GDP弹性系数法因考虑因素过于单一，不符合高度城市化区域中负荷受多因素影响现状，因此预测准确度也属于偏低；③本文所提的“层次分析+模糊聚类”预测方法针对中长期负荷预测的较大不确定性，将专家经验科学引入以进行智能化干预，同时通过对多因素的协同考察来将样

本内蕴含的模糊关联信息清晰化和量化，以达成有效的负荷预测辅助决策。在运用“近大远小”规则后，本文所提模型将能更好地吻合高度城市化区域的中长期负荷变化规律，因此预测准确度是最高的。

5 结束语

本文针对新形势下高度城市化区域负荷变化的新规律，提出以城市化因素分析为依托，以层次分析法为前奏，以模糊聚类法为抓手，构建关于中长期负荷预测的新型模型。结合A市的实际数据的算例表明：

1) 相较于基于时序外推的传统预测方法，本文提出的方法不受负荷序列具体形状的影响，与高度城市化区域的渐进性饱和趋势波动特性相适应。

2) 相较于基于单因素分析的预测方法，本文所提模型可囊括各类相关因素，并通过专家知识确定各因素权重，从而使负荷预测的过程更具全面性，使负荷预测结果的可信程度更高。

因此，关于高度城市化区域的负荷预测，本文提出的方法在总体上是有效的。当然，限于水平和知识，本项研究仍然有不足之处，主要体现在以下方面：

1) 在执行“近大远小”原则时，虽然对权重分配有定性认识，但未形成科学的定量方法，所产生的权重值的主观性比较明显，这在一定程度上影响预测结果的稳定性。

2) 电力负荷变化是一个复杂体系，除了受产业、人口和地域等主要因素作用之外，还受经济政策、天气异动和自然灾害等因素影响。特别是近些年来，一方面国家改革步入深水区，各种矛盾凸显，经济政策调整的节奏在加快；另一方面，全球气候变迁不再遵循常态，灾异情况有所增加。这些都给高度城市化区域的负荷预测带来不确定因子，使得预测出现误差的可能性加大。

今后，应以严谨的数学模型为基础，充分吸纳和融合各类专家知识，并结合各地实际状况，将以上不足之处进行针对性提升，以期使城市化区域的负荷预测更加准确和有效。

参考文献

- [1] 康重庆, 夏清, 刘梅. 电力系统负荷预测 [M]. 北京: 中国电力出版, 2007: 18-21.
- [2] 肖欣, 周渝慧, 张宁, 等. 城市电力饱和负荷分析技术及其应用研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2014, 34 (6): 146-152.
- [3] 刘英群. 中国城市化: 经济、空间和人口 [D]. 大连: 东北财经大学, 2011.
- [4] 张伏生, 刘芳, 赵文彬, 等. 灰色 Verhulst 模型在中长期负荷预测中的应用 [J]. 电网技术, 2003, 27 (5): 37-39, 81.
- [5] 许梁, 孙涛, 徐箭, 等. 基于函数型非参数回归模型的中长期日负荷曲线预测 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (7): 89-94, 100.
- [6] 王大鹏, 汪秉文. 基于变权缓冲灰色模型的中长期负荷预测 [J]. 电网技术, 2013, 37 (1): 167-171.
- [7] 袁铁江, 袁建党, 晃勤, 等. 电力系统中长期负荷预测综合模型研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40 (14): 143-146, 151.
- [8] Al-hamadi H M, Soliman S A. Long-term/mid-term electric load forecasting based on short-term correlation and annual growth [J]. Electric Power Systems Research, 2005, 74 (3): 353-361.
- [9] Carpinteiro O A S, Leme R C, de Souza A C Z, et al. Long-term load forecasting via a hierarchical neural model with time integrators [J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77 (3): 371-378.
- [10] 李瑾, 刘金朋, 王建军. 采用支持向量机和模拟退火算法的中长期负荷预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (16): 63-66.
- [11] 顾洁. 基于物元模型的电力系统中长期负荷预测 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (6): 68-71.
- [12] 崔旻, 顾洁. 基于数据挖掘的电力系统中长期负荷预测新方法 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (6): 18-21.
- [13] 王守相, 张一帆, 葛磊蛟. 新型城镇配电网影响因素解释结构模型 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35 (11): 75-81.
- [14] Sha Hid Y, Tony S. China urbanizes: consequences, strategies, and policies [M]. Washington DC, USA: World Bank Publications, 2008.
- [15] 方创琳, 王德利. 中国城市化发展质量的综合测度与提升路径 [J]. 地理研究, 2011, 30 (11): 1931-1946.
- [16] 焦艳燕. 基于数据挖掘方法的居民生活用电负荷预测研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [17] 王小鲁. 中国城市化路径与城市规模的经济分析 [J]. 经济研究, 2010 (10): 20-32.
- [18] 周淦, 任海军, 李健, 等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (16): 47-52.
- [19] 李春祥, 牛东晓, 孟丽敏. 基于层次分析法和径向基函数神经网络的中长期负荷预测综合模型 [J]. 电网技术, 2009, 33 (2): 99-104.
- [20] 杨旭. 小城镇配电网发展规划及示范应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2015.

(收稿日期: 2017-03-20) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告