[能源互联网]

城市能源互联网发展潜力评估研究

文/国网福建省电力有限公司　林　佳　宣菊琴　林昶咏

阐述了城市能源互联网发展潜力的主要研究内容，构建了城市能源互联网发展潜力评估指标体系，最后基于熵权–优序关系法对指标进行赋权，并构建相对潜力评估模型，运用TOPSIS法对四个典型城市的能源互联网发展潜力进行评价，以期为城市能源互联网的后续发展提供科学合理的建议。

随着化石能源的日渐枯竭和环保意识增强，有序合理地开发分布式资源已成为世界能源转型的热点问题，在市区构建城市能源互联网成为城市未来发展的重要建设内容之一。但是，国内外对城市能源互联网的建设研究主要集中在城市能源互联网建设关键技术体系分析方面，对城市能源互联网发展潜力评价的研究较少。本文通过设计城市能源互联网发展潜力评价指标体系与构建城市能源互联网发展潜力评价模型，从而实现对城市能源互联网发展潜力和建设能力的定量测评，为城市能源互联网建设和发展提供理论指导和借鉴。

城市能源互联网发展潜力主要研究内容

1）能源服务能力。城市能源互联网的服务潜力是运用各类方法与途径来满足居民、商业和工业等各类主体的能源服务消费的一种潜力，也指城市能源互联网建设和发展所能够满足广大用户需求的一种潜在的发展能力，包括能源供应服务潜力和能源消费服务潜力。

2）科技创新能力。城市能源互联网的科技创新潜力是指城市能源互联网的整个科技创新和科技发展的潜力之和，主要通过公众的科技创新潜力、企业的科技创新潜力、学校的科技创新潜力、科研机构的科技创新潜力和其他社会组织的科技创新潜力等进行综合体现，是多种科技创新潜力的综合体，对城市能源互联网建设和发展具有重要的推动作用。

3）信息化能力。信息基础设施潜力反映了城市能源互联网信息化程度和信息处理能力的水平，信息基础设施潜力与城市能源互联网的能源服务水平和服务能力息息相关，对用来衡量地区或城市的现代化程度发展水平和城市信息化程度具有重要意义。

城市能源互联网发展潜力评估

1．城市能源互联网发展潜力评估指标体系构建

根据城市能源互联网发展评价指标的研究现状，有关城市能源互联网建设和发展方面的评价指标体系从不同角度和层面来进行衡量和描述城市能源互联网，本文构建了城市能源互联网发展潜力评价指标体系，如表1所示。

基于熵权－优序关系的指标组合赋权包括以下几种方法。

（1）熵权法

熵权法通过分析各指标变动的趋势，借助信息熵确定各指标的熵值，然后利用熵权修正各指标权重，从而得出较为客观的指标权重，计算第 j 项指标的熵值为

$$Q_j = -\frac{1}{1nm}\sum_{i=1}^{m} p_{ij} 1nP_{ij} \qquad (1)$$

基金项目：国网福建省电力有限公司《城市能源互联网发展方向和政策研究》项目资助

表1　城市能源互联网发展潜力评估指标体系

目标层	准则层	因素层	指标层
城市能源互联网发展潜力A	发展潜力支持力B1	经济发展水平C1	第三产业贡献率(%)
			第三产业增加值/亿元
			人均GDP/元
		科技发展状况C2	城市总GDP/亿元
			每万人专利申请数/件
			科研机构技术开发费用占GDP比重(%)
			科研支出占地方财政支出比重(%)
	发展潜力保障力B2	基础设施条件C3	城市人口密度/(人/km^2)
			第二产业增加值/亿元
			人均电信业务量/元
			充电桩数量/万个
		投入水平C4	充换电站数量/座
			R&D活动人员/人
			R&D经费支出/亿元
			节能环保支出占地方财政支出比重(%)
			全年授权专利数量/件
	能源生产和消费能力B3	生产潜力C5	一次能源生产量/万t标准煤
			电力生产量/(亿kW·h)
			城市人口总数/万人
		需求潜力C6	城市人均可支配收入/元
			城市终端能源消费总量/万t标准煤
			城市终端电力消费总量/(亿kW·h)
			城市新能源汽车保有量/万辆
			第二产业占比(%)
			第三产业占比(%)

其中，

$$P_{ij}=-\frac{(1+\hat{r}_{ij})}{\sum_{i=1}(1+\hat{r}_{ij})} \tag{2}$$

从而，第j项指标的熵权为

$$W_j=-\frac{(1+Q_j)}{\sum_{j=1}^{m}(1-Q_j)} \tag{3}$$

式中，Q_j是第$j(j=1,\cdots,n)$项指标的熵值；m是待评价项目；P_{ij}是每种状态出现的概率；r_{ij}是待评价项目i的j项指标值；w_j是第j项指标的权重。

（2）优序关系法

优序关系法能有效解决所有指标进行两两比较并构造判断矩阵中工作量大且难通过一致性检验的问题，确定权重的步骤如下。

1）确定序关系。设x_1，$x_2,\cdots,x_n(n\geqslant 2)$是多层指标体系中的$n$个指标，对于某一个评价准则，当$x_i\geqslant x_j$时，说明指标$x_i$的重要程度不低于$x_j$。如果现在有$n$个指标$x_1$，$x_2,\cdots,x_n$存在$x_1\geqslant x_2\geqslant\cdots\geqslant x_n$关系，则$n$个指标$x_1$，$x_2,\cdots,x_n$是按“$\geqslant$”建立了序关系。确定序关系的步骤如下：①专家根据评价准则在方案集$\{x_1,x_2,\cdots,x_n\}$中选出一个认为第一重要的方案，记为x^*_1；②专家在含有$n-1$个方案的方案集里，选出一个认为第一重要的方案，记为x^*_2；③挑选了k次后，专家在剩下的$n-(k-1)$个方案集里选出一个认为第一重要的方案，记为x^*_k；④最后，经过$n-1$次选择后，剩余的方案集里的唯一一个方案，记为x^*_n。

2）各个指标重要程度的定量分析。指标x_{k-1}与x_k重要度的比为$\frac{\omega_{k-1}}{\omega_k}$，即$\frac{\omega_{k-1}}{\omega_k}=r_k(k=n,n-1,\cdots,2)$，$\omega_k$为指标$x_k$的主观权重。

3）序关系相似度。以序关系为基准，采用n分赋值法，n是专家的个数，设p和q为相对基准序关系，即$p+q=n$，当基准序关系一致时，专家数取值为p，反之则为q。①如果$p>q$，那么一致性专家数为p，记为p分，反之记为q分；②如果$p=q$，那么全部专家序关系都一致，记为p分。

由上述方法得出的L个专家的权重为$a=(a_1,a_2,\cdots,a_L)$。

表2　序关系赋值表

r_k	说明
1.0	x_{k-1}与x_k有同样的重要性
1.2	x_{k-1}比x_k稍微重要
1.4	x_{k-1}比x_k明显重要
1.6	x_{k-1}比x_k强烈重要
1.8	x_{k-1}比x_k极端重要
1.1，1.3，1.5，1.7	分别介于以上各值之间

4）主观权重的计算。由专家的赋值r_k，计算指标权重ω_n为

$$\omega_n=\left(1+\sum_{k=2}^{n}\prod_{i=k}^{n}r_i\right)^{-1} \tag{4}$$

$$\omega_{k-1}=r_k\omega_k(k=n,n-1,\cdots,2) \tag{5}$$

根据式（4），基于专家决策算得ω_n后再根据式（5）计算$\omega_1:\omega_{n-1}$。

结合序关系法，求得指标x_k的主观权重为

$$v_k = \sum_{i=1}^{L} a_i \times \omega_{ik} \tag{6}$$

（3）混合加权法

将运用熵权法和序关系法得到的权重结果进行综合加权，结果以客观权重计算结果辅助主观权重，增加主观权重的准确性，结合主客观权重，综合评价结果等级。综合权重计算式为

$$\omega_{综合} = \frac{\omega_{ij} g v_{ij}}{\sum(\omega_{ij} g v_{ij})} \tag{7}$$

式中，ω_{ij}是客观权重；v_{ij}是主观权重。

目前层的合成权重由各级指标权重由上而下逐层合成，最终得到最底层指标的合成权重。

2．基于TOPSIS价值函数的评估模型

TOPSIS法是一种通过与理想解的逼近程度进行排序的方法。根据评价对象与理想目标的相对接近程度对其进行排序，从而判断评价对象的相对优劣程度。其基本思想是：与正理想解距离最小的方案最优；反之则最劣。TOPSIS法可以对多个具有可度量性的被评价对象进行排序，其基本步骤如下。

1）建立原始数据矩阵X

$$X = (x_{ij})_{n\times m} \tag{8}$$

2）运用标准化转换公式将初始矩阵无量纲化处理，得到规范化矩阵Y

$$y_{ij} = \begin{cases} (x_{ij} - x_j^{\min}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}), x_{ij} \text{ 为正向指标} \\ (x_j^{\max} - x_{ij}) / (x_j^{\max} - x_j^{\min}), x_{ij} \text{ 为负向指标} \end{cases} \tag{9}$$

式中，y_{ij}是标准化后的指标值；x_{ij}是第i个方案的第j个指标值；$x_j^{\min}$是第j个指标的最小值；$x_j^{\max}$是第j个指标的最大值。$x_j^{\min}$和$x_j^{\max}$可通过搜索历史运行数据库得到，也可根据相关机理分析进行确定。

3）对指标赋权。

4）构造加权规范化矩阵。将规范化数据加权后得到加权规范化矩阵P

$$P = (p_{ij})_{n\times m} = (\omega_{ij} y_{ij})_{n\times m} \tag{10}$$

5）实际情况下，没有绝对的最优解和最差解，因此可以运用下面公式确定评价指标的正理想解和负理想解。

$$V^+ = \{(\max_{\substack{1\leqslant i\leqslant 4\\ 1\leqslant j\leqslant 3}} p_{ij} \mid p_{ij} \text{为正指标}),\ (\min_{\substack{1\leqslant i\leqslant 4\\ 1\leqslant j\leqslant 3}} p_{ij} \mid p_{ij} \text{为逆指标})\ (\text{最佳值}_{\substack{1\leqslant i\leqslant 4\\ 1\leqslant j\leqslant 3}} p_{ij} \mid p_{ij} \text{为无量纲指标})\} \tag{11}$$

$$V^- = \{(\min_{\substack{1\leqslant i\leqslant 4\\ 1\leqslant j\leqslant 3}} p_{ij} \mid p_{ij} \text{为正指标}),\ (\max_{\substack{1\leqslant i\leqslant 4\\ 1\leqslant j\leqslant 3}} p_{ij} \mid p_{ij} \text{为逆指标})\ (\text{最差值}_{\substack{1\leqslant i\leqslant 4\\ 1\leqslant j\leqslant 3}} p_{ij} \mid p_{ij} \text{为无量纲指标})\} \tag{12}$$

式中，V^+为指标集的正理想解；V^-为指标集的负理想解。

6）计算距离尺度，即计算每个目标到正理想解和负理想解的距离，距离尺度可以通过n维欧几里得距离来计算。目标到正理想解V^+的距离为S_k^+，到负理想解V^-的距离为S_k^-

$$S_k^+ = \left[\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}(v_{ij}^k - v_{ij}^+)^2\right]^{\frac{1}{2}} (k = 1,2,\cdots,m) \tag{13}$$

$$S_k^- = \left[\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{3}(v_{ij}^k - v_{ij}^-)^2\right]^{\frac{1}{2}} (k = 1,2,\cdots,m) \tag{14}$$

式中，k表示第k个方案，共有m个方案。

7）计算相对贴近度。即评价对象与正理想解和负理想解的相对贴近度

$$C_k \frac{S_k^-}{S_k^+ + S_k^-} (k = 1,2,\cdots,m) \tag{15}$$

式中，$0 \leqslant C_k \leqslant 1$。当$C_k = 0$时，$V_i = V^-$，表示该目标为最劣目标；当$C_k = 1$时，$V_i = V^+$，表示该目标为最优目标。在实际的多目标决策中，最优目标和最劣目标存在的可能性很小。

8）根据理想的贴近度C_k大小进行排序

根据C_k的值按从小到大的顺序对各评价目标进行排列。排序结果贴近度C_k值越大，该目标越优，C_k值最大的为最优评标目标，意味着发展潜力越好。

3．相对潜力模型构建

由于不同城市的经济、资源、文化和政策等各项指标的最大合理值存在差异，为了能够公平公正地对各城市的城市能源互联网发展潜力进行评价，需要制定统一的评价标准，从而保证评价结果的可比性，使得各城市可以进行横向对比。因此，需要进行标准化处理，从而得到潜力评价指标的相对得分值，即

$$Q_{pi} = \frac{F_i^+ - f_{pi}}{F_i^+} = 1 - \frac{f_{pi}}{F_i^+} (i = 1,2,L,7; p = 1,2,3,4) \tag{16}$$

式中，Q_{pi}是各城市因素层指标F_i中第i项指标标准化后的分值；F_i^+是第i项指标的最大合理值；$\frac{f_{pi}}{F_i^+}$是各省市对应的得分矩阵的值。

在对相对得分值计算的结果上，利用加权求和公式，将7个因素的相对得分值结果求和，计算得出各城市的发展潜力的综合得分。通过对4个试点城市的城市能源互联网发展潜力的综合得分情况进行对比，分析城市及城市能源互联网发展潜力在全国试点城市的相对潜力水平，得分越高，

表明其发展潜力越大。加权求和公式如下式所示

$$w_p = \sum_i \lambda Q_{pi} (i = 1,2,L,7; p = 1,2,3,4) \quad (17)$$

式中，w_p是各城市的城市能源互联网发展潜力综合得分；λ是因素层各指标的权重，本文中$\lambda = 1$。

算例分析

1．城市能源互联网发展程度测算

（1）求解规范化矩阵

运用式（9），分别求解评价指标体系中6个因素层指标的规范决策矩阵，部分求解结果如表3所示。

表3　发展潜力支持力的各因素规范矩阵

城市	经济发展水平				科技发展状况		
天津	0.630 8	0.227 2	0.525 9	0.508 8	0.586 2	0.508 3	0.436 8
上海	0.549 6	0.504 3	0.559 9	0.840 2	0.571 5	0.799 0	0.643 4
嘉兴	0.302 5	0.070 4	0.417 8	0.133 6	0.380 4	0.101 7	0.507 3
厦门	0.456 7	0.830 1	0.485 2	0.131 4	0.430 1	0.305 0	0.371 2

（2）构建加权规范矩阵

通过指标体系构建，得出6个因对应的测量指标的权重分别是：

ω_1=（0.175 62 0.180 35 0.318 26 0.325 77）

ω_2=（0.284 88 0.314 77 0.400 35）

ω_3=（0.126 59 0.205 96 0.185 76 0.234 88 0.246 85）

ω_4=（0.241 47 0.244 17 0.245 78 0.268 58）

ω_5=（0.321 49 0.678 51）

ω_6=（0.112 47 0.118 79 0.171 36 0.190 11 0.107 85 0.149 81 0.149 16）

由式（10）求得发展潜力支持力、发展潜力保障力以及能源生产和消费潜力的各因素加权规范矩阵，部分结果如表4所示。

表4　发展潜力支持力的各因素加权规范矩阵

城市	经济发展水平				科技发展状况		
天津	0.110 8	0.041 0	0.167 4	0.165 7	0.167 0	0.160 0	0.174 9
上海	0.096 5	0.091 0	0.178 2	0.273 7	0.162 8	0.251 5	0.257 6
嘉兴	0.053 1	0.012 7	0.133 0	0.043 5	0.108 4	0.032 0	0.203 1
厦门	0.080 2	0.149 7	0.154 4	0.042 8	0.122 5	0.096 0	0.148 6

（3）城市能源互联网发展程度测算

根据式（11）～式（15），分别计算6个因素对应的相对贴进度，从而得到城市能源互联网试点城市的城市能源互联网发展程度综合得分及排名如表5所示。

表5　城市能源互联网发展程度综合得分及排名

城市	经济发展水平	科技发展状况	基础设施条件	投入水平	生产潜力	消费潜力	发展程度综合得分	排名
天津	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	0.482	2.937	2
上海	0.806	0.984	0.658	1	0.527	0.843	4.817	1
嘉兴	0.003	0.189	0.082	0.008	0.011	0.202	0.494	4
厦门	0.376	0.252	0.485	0.050	0.068	0.13	1.36	3

通过上述计算和分析得到四个试点城市的能源互联网发展程度的综合得分及排名。由表5可以看出，目前，城市能源互联网发展程度与经济发展趋势相一致，上海、天津的发展程度较高，嘉兴与厦门的发展程度较低。说明嘉兴与厦门城市能源互联网未来的发展空间较大，发展潜力有待不断发掘。

2．城市能源互联网发展潜力测算

首先，构建权重矩阵W，得出6个因素对应的权重矩阵

W=（0.693 63 0.306 37 0.821 11 0.178 89 0.333 33 0.666 67）

其次，提取每个因素规范权重矩阵中的最大值，并将其与权重矩阵相乘，分别得出6个因素的最大合理值表6所示。

然后，再将各因素规范矩阵与权重矩阵相乘，得到各因素的得分矩阵，如表7所示。

表6　各因素最大合理值

因素	经济发展水平	科技发展状况	基础设施条件	投入水平	生产潜力	消费潜力
最大合理值	0.582 8	0.244 8	0.788 3	0.1655	0.252 5	0.586 1

表7　各因素得分矩阵

城市	经济发展水平	科技发展状况	基础设施条件	投入水平	生产潜力	消费潜力
天津	0.336 3	0.153 8	0.185 4	0.090 4	0.017 4	0.226 2
上海	0.443 5	0.205 9	0.550 8	0.137 9	0.169 1	0.393 0
嘉兴	0.168 1	0.105 2	0.157 4	0.032 8	0.051 5	0.077 3
厦门	0.296 3	0.112 5	0.427 0	0.037 0	0.045 9	0.091 5

（下转第26页）

GMDSS的相关要求。

2）风电场系统通信应根据风电场接入系统的通信设计确定。通信业务包括：调度电话、调度自动化、系统继电保护及安全自动装置和生产管理信息等。

3）海上升压站与陆上集控中心的场内通信应具备2条独立的通信通道，宜选择数字光纤通信方式，海上升压站与陆上集控中心的通信不得中断。海上升压站与陆上集控中心的光传输设备宜选用SDH，且应双套冗余配置。

4）海上风电场应配置一套场内生产调度及管理电话系统，宜采用具有IP语音交换功能的数字程控调度交换机。主机设置于陆上集控中心，海上升压站及海上风电机组分别部署IP语音网关和IP电话，实现全场语音通话业务。

5）海上升压站的无线通信应至少设置1套无线对讲系统，作为平台内部通信方式。应设置2套海洋船舶专用甚高频－调频（VHF－FM）无线通信系统，作为与周围作业船只的通信方式。

6）海上升压站应急通信系统应至少包括：1台能发送和接受的VHF（A1海区）或MF（A2海区）双向无线电装置；1台搜救雷达应答器（SART）；1台航行警告接收系统（NAVTEX）、1台应急无线电示位标（A1海区）或应急卫星示位标（A2海区）。

7）海上升压站和陆上集控中心的通信电源宜采用一体化电源的通信用直流变换电源，与场站内控制保护直流电源共用蓄电池。当风电场接入系统设计有要求时也可采用带专用蓄电池的直流电源系统。

结束语

目前已建成的海上风电场大多离岸距离在40 km以内，建设海上交流升压站将电能通过交流海缆接入陆上集控中心后再并网发电。未来随着海上风电进一步开发，离岸距离越来越远，当离岸距离超过60 km以上时，由于交流电缆充电功率的问题，将会越来越多采用直流海缆，建设海上换流站，会对海上风电场电气二次设计提出更多更复杂的要求。EA

（上接第21页）

表8　试点城市城市能源互联网发展潜力综合得分及排名

城市	经济发展水平	科技发展状况	基础设施条件	投入水平	生产潜力	消费潜力	发展程度综合得分	排名
天津	0.423 0	0.371 9	0.764 8	0.453 6	0.931 1	0.614 0	3.558 3	3
上海	0.239 0	0.159 0	0.301 4	0.166 7	0.330 2	0.329 4	1.525 8	4
嘉兴	0.711 6	0.570 1	0.800 3	0.802 0	0.796 2	0.868 2	4.548 5	1
厦门	0.491 6	0.540 5	0.458 5	0.776 1	0.818 0	0.843 9	3.928 7	2

最后，根据相对潜力模型得到城市试点城市（天津、上海、嘉兴和厦门）的城市能源互联网发展潜力的综合得分及排名。

通过上述计算和分析结果可知，经济发展水平与城市能源互联网发展潜力不是正相关的关系，也就是说，对于经济发展水平高的城市来说，其城市能源互联网发展潜力不一定高。以城市能源互联网发展潜力得分为依据，可对各城市的城市能源互联网发展潜力进行排名：嘉兴＞厦门＞天津＞上海。

本文主要对城市能源互联网的发展潜力进行了评估，在定义城市能源互联网发展潜力的基本概念基础上分析了城市能源互联网发展潜力的主要研究内容。其次，确定了城市能源互联网发展潜力的影响因素。再次，构建了城市能源互联网发展潜力评估指标体系。最后，运用混合加权法对主客观权重赋权及基于TOPSIS价值函数的评估模型与相对潜力测算模型，并选取评估了四个试点城市的城市能源互联网发展程度和发展潜力，得到城市能源互联网发展潜力排名：嘉兴＞厦门＞天津＞上海。EA