

# 基于负荷控制潜力量化模型的工业用户群体画像方法

陈逸涵,李 扬,沈运帷

(东南大学 电气工程学院,江苏 南京 210096)

**摘要:**在中国新一轮电力体制改革背景下,研究工业用户负荷参与负荷控制的潜力,对于促进电网安全稳定运行有着积极的作用。以工业用户负荷数据为基础,充分提取用户在不同时间尺度下的用电特征,从错峰潜力、轮休潜力和避峰潜力3个方面构建多时间尺度负荷控制潜力指标体系。进而将信息熵和逼近理想解排序法相结合,构建负荷控制潜力量化模型,实现了对负荷控制潜力价值的衡量。并且,利用近邻传播算法分析量化模型结果,将用户按照潜力量化值聚类,实现了对不同用户特征群的划分。最后,基于某地区的实际工业用户负荷数据进行算例分析,实现了对工业用户群体负荷控制潜力画像结果的呈现。

**关键词:**负荷控制;潜力评估;工业用户;量化模型;近邻传播算法;用户画像

**中图分类号:**TM 714

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202104008

## 0 引言

随着社会、经济的不断发展,电力需求持续攀升,电力网络发展和供电服务质量面临更加严峻的挑战。风电、光伏等新能源发电的推广和使用,加剧了用电高峰期电网供需两侧的不平衡现象,从而威胁电网可靠性。需求侧资源因其具有灵活性、经济性等特征已逐渐成为促进供需平衡和电网稳定的重要手段之一<sup>[1-2]</sup>。随着智能电网的快速发展,可以通过双向互动的智能量测技术处理负荷数据、优化调度负荷,为电力系统提供调峰、调频、备用等辅助服务<sup>[3]</sup>。

参与负荷控制项目的用户在负荷类型、负荷重要程度、负荷可中断性等方面差异较大,不同类型的用户对日期类型、温度、价格、政策的敏感度也各不相同。因此,在具体实施负荷控制时应充分考虑不同用户潜力的多样性,选择合适的负荷资源<sup>[4-5]</sup>。为了更加有效利用需求侧的动态可控资源,充分发挥其潜能,有必要深入挖掘负荷数据,提炼出更准确的用户用电模式的共性特征和共同规律<sup>[6]</sup>,建立负荷控制潜力评价指标。根据量化的评价指标为负荷控制项目的具体实施提供依据,真正实现信息和电能的交互。

目前国内已经有诸多学者对负荷控制潜力量化进行了研究,文献[7]结合实际电力调控的需求,根据聚类确定用户所在小组,构建小组潜力评估体系,得到优化序列结果。文献[8]利用综合评价方法确定各用户错峰序位表,结合可错峰负荷大小对用户

进行分组,依据用户组的顺序安排各级错峰的用户构成,但是该方法研究的负荷控制方式和研究对象类型都较为单一。文献[9]结合主客观综合赋权,根据加权贴近度对参与用户进行排序,但是其并未对具体的实施方案进行进一步的研究分析,且该方法过于复杂,不利于推广。文献[10]考虑4种类型的负荷调控潜力评估,结合灰靶-前景理论对4种潜力类型进行量化,利用模糊评判法对量化结果进行进一步的评估分析,但是其没有对如何利用评估结果进行实施方案的制定进行说明,且指标的选取也没有充分考虑用户的负荷特性。

综上,现有对负荷控制潜力量化的研究大多仅考虑了单一的负荷控制方式,评价体系参量的设定较少,对用户负荷的分析不够全面。对于量化的结果的应用和参与负荷调控的用户选取方式的研究相对有限,未形成对用户负荷控制潜力的完整画像。为此,本文的工作主要集中在以下两方面:一方面,考虑不同时间尺度下的负荷控制方式,在充分挖掘用户负荷特征的基础上,建立错峰、轮休和避峰的负荷控制潜力指标体系,利用综合评价方法客观地量化负荷控制潜力;另一方面,利用近邻传播算法完成对工业用户群体全面、完整、科学的潜力画像,辨识用户负荷控制特性,提炼出共性特征,为负荷控制方案的制定提供依据,提高负荷控制实施效率。

## 1 多时间尺度负荷控制潜力指标体系

根据《加强电力需求侧管理工作的指导意见》中的相关规定,负荷控制是指通过电力负荷管理系统对客户实施错峰、避峰、限电。控制客户用电负荷、调整客户用电负荷需求是需求侧管理的重要技术手段。错峰是指将高峰时段的用电负荷转移到其他时段,通常不减少电能使用。按照时间尺度的不同可

收稿日期:2020-08-20;修回日期:2021-02-08

基金项目:国家电网公司科技项目(52182019000J)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(52182019000J)

以分为<sup>[8]</sup>时段尺度——错时潜力,即在一天内,将用电负荷从用电高峰时段转移到低谷时段,合理规划用电;日尺度——轮休潜力,即合理调整企业的周休日,减少工作日的用电负荷,适当增加周六和周日的用电负荷;上述2种负荷控制方式均属于错峰类型<sup>[11]</sup>,可以缓解电网的高峰用电压力,实现削峰填谷的作用,使得负荷曲线趋于平衡,但并不会减少电能的使用。

除此之外,该指标评价体系还包括避峰潜力<sup>[8]</sup>,避峰是指高峰时段削减、中断或停止用电负荷,通常会减少电能使用。限电是指在特定时段限制某些用电负荷的部分或全部用电需求,对用户的生产和生活方式产生的影响较大,因此潜力指标体系中不考虑限电。

参与负荷控制的用户不可避免地会产生一定的经济损失,因此实际应用中也应考虑经济指标,尽量减少用户损失。

负荷控制潜力指标体系就是建立用户在错时、轮休和避峰3个方面的潜力评估体系,是构建工业用户负荷控制潜力画像的基础。

一个用户可以参与不同负荷控制业务,表现出的潜力也不尽相同。用户参与不同负荷控制业务潜力值计算应该是相互独立,互不影响的。

最终,根据不同时间尺度下的负荷控制方式,即时段尺度——避峰、日尺度——错时、周尺度——轮休,构建形成的多时间尺度负荷控制潜力指标体系如表1所示。

表1 多时间尺度负荷控制潜力指标体系  
Table 1 Multi-time scale load control potential index system

目标层	准则层	指标层
多时间尺度负荷控制潜力指标体系	错时潜力	波动率 $\alpha_{11}$
		错时负荷 $\alpha_{12}$
		峰谷差率 $\alpha_{13}$
		单位电量成本 $\alpha_4$
	轮休潜力	轮休负荷 $\alpha_{21}$
		轮休负荷下降率 $\alpha_{22}$
		单位电量成本 $\alpha_4$
		峰时平均负荷差异系数 $\alpha_{31}$
	避峰潜力	最大负荷与温度相关性 $\alpha_{32}$
		避峰负荷 $\alpha_{33}$
		单位电量成本 $\alpha_4$

### 1.1 错时潜力指标

错时潜力指标由波动率 $\alpha_{11}$ 、错时负荷 $\alpha_{12}$ 、峰谷差率 $\alpha_{13}$ 和单位电量成本 $\alpha_4$ 构成,单位电量成本 $\alpha_4$ 的定义见1.4节。

#### 1.1.1 波动率

波动率反映的是负荷曲线的波动情况,其反映了负荷在时间尺度上分散程度的大小。波动率越

大,用户的负荷曲线起伏越大,进行错时、错峰的可靠性就越强,相应的潜力也就越大。具体公式为:

$$\alpha_{11} = \sigma/\mu \quad (1)$$

其中, $\sigma$ 为用户典型日负荷曲线的负荷标准差; $\mu$ 为用户典型日负荷曲线的负荷均值。

#### 1.1.2 错时负荷

错时负荷是指在用电高峰时段有计划减少的用电量,通过错时能够有效减少全网高峰时段的用电负荷。具体公式为:

$$\alpha_{12} = P_{\text{peak}} - \min(P_{\text{advance}}, P_{\text{delay}}) \quad (2)$$

其中, $P_{\text{peak}}$ 为全省高峰时段用户负荷值; $P_{\text{advance}}$ 、 $P_{\text{delay}}$ 分别为全省高峰时段提前 $T_1$ 小时和推迟 $T_2$ 小时的用户负荷值, $T_1$ 、 $T_2$ 可根据电网高峰时段持续的时间来确定。高峰时段认为是负荷值大于95% $P_{\text{peak}}$ 所持续的时间。

#### 1.1.3 峰谷差率

峰谷差率是指用户典型日负荷曲线的最大负荷与最小负荷之差占最大负荷的比重。具体公式为:

$$\alpha_{13} = (P_{\text{max}} - P_{\text{min}})/P_{\text{max}} \quad (3)$$

其中, $P_{\text{max}}$ 、 $P_{\text{min}}$ 分别为用户典型日负荷曲线的最大负荷和最小负荷。

### 1.2 轮休潜力指标

轮休潜力指标由轮休负荷 $\alpha_{21}$ 、轮休负荷下降率 $\alpha_{22}$ 和单位电量成本 $\alpha_4$ 构成,单位电量成本 $\alpha_4$ 的定义见1.4节。

#### 1.2.1 轮休负荷

对于有周休安排的用户,通常休息的时间都是周六、周日,此时周末的负荷会较工作日的负荷有所下降,将下降的值定义为轮休负荷。轮休负荷是一个绝对值,其值越大表明越具有明显轮休潜力,应该优先安排进行轮休。具体公式为:

$$\alpha_{21} = |\bar{P}_{\text{weekday}} - \bar{P}_{\text{weekend}}| \quad (4)$$

其中, $\bar{P}_{\text{weekday}}$ 为用户工作日的日负荷的平均值; $\bar{P}_{\text{weekend}}$ 为用户周末的日负荷的平均值。

#### 1.2.2 轮休负荷下降率

轮休负荷下降率反映的是周末负荷较工作日负荷下降的程度,是一个反映轮休潜力的相对值。同样地,轮休负荷下降率越大,表明用户轮休特征越显著。具体公式为:

$$\alpha_{22} = (\bar{P}_{\text{weekday}} - \bar{P}_{\text{weekend}})/\bar{P}_{\text{weekday}} \quad (5)$$

### 1.3 避峰潜力指标

避峰潜力指标由峰时平均负荷差异系数 $\alpha_{31}$ 、最大负荷与温度相关性 $\alpha_{32}$ 、避峰负荷 $\alpha_{33}$ 和单位电量成本 $\alpha_4$ 构成,单位电量成本 $\alpha_4$ 的定义见1.4节。

#### 1.3.1 峰时平均负荷差异系数

若一个用户具有较大的避峰潜力,那么其在全

网负荷的高峰时段必然有相对较高的负荷,推动全网负荷高峰的形成。因此定义峰时平均负荷差异系数,当该指标值大于0时反映用户对全网高峰负荷的形成有贡献,指标值越大,贡献越大,其相应的避峰潜力也就越大。具体公式为:

$$\alpha_{31} = \bar{P}_{\text{peak}}/P_{\text{max}} - \bar{P}_{\text{allday}}/P_{\text{max}} \quad (6)$$

其中,  $\bar{P}_{\text{peak}}$  为高峰时段用户负荷的平均值;  $\bar{P}_{\text{allday}}$  为用户全天负荷的平均值。

### 1.3.2 最大负荷与温度相关性

通过计算最大负荷与温度的相关性指标  $\alpha_{32}$  可以间接反映负荷高峰是否由温控负荷造成的。相关性越高,表明负荷大部分是温控负荷,而由于关停温控负荷的措施方便快捷,且造成的经济影响小,对于这样的用户应该优先安排实施避峰类型的负荷控制。

### 1.3.3 避峰负荷

避峰负荷是指用户在用电高峰时段,通过紧急关停设备所快速下降的负荷量。但并不表示降至0,为了保证生产安全,最多降至安保负荷。具体公式为:

$$\alpha_{33} = P_{\text{peak}} - P_{\text{safe}} \quad (7)$$

其中,  $P_{\text{safe}}$  为保证安全生产的安保负荷。

### 1.4 经济指标

实施负荷控制不可避免地会造成一定的经济损失,不同用户的损失值是不同的。为了尽可能地提高经济效益,应该优先安排单位电量成本小的用户参与负荷控制。单位电量成本计算公式为:

$$\alpha_4 = C_{\text{total}}/W_{\text{total}} \quad (8)$$

其中,  $C_{\text{total}}$  为用户的年生产总值;  $W_{\text{total}}$  为用户的年总用电量。

单位电量成本作为3种潜力的共有指标,对3种潜力类型的量化评估均起到重要作用。

建立全面、合理的负荷控制潜力指标体系可以更加科学地选取合适的工业用户群体提供服务。

## 2 负荷控制潜力量化模型

量化负荷控制潜力指标,提炼出用户的用电共性特征,为用户选择合适的负荷控制实施方案,是一种涉及多属性指标决策的问题<sup>[12]</sup>。本文提出一种结合熵权法确定多指标的客观权重方法<sup>[13]</sup>,利用逼近理想解排序TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)法<sup>[14]</sup>对用户的负荷控制潜力进行量化。

### 2.1 评价矩阵的建立

基于上述的负荷控制潜力指标体系,假设  $P_1$  代表错峰潜力,  $P_2$  代表轮休潜力,  $P_3$  代表避峰潜

力;参与的用户集为  $K = [k_1, \dots, k_i, \dots, k_m]$ , 共有  $m$  个不同的用户;向量  $Y = [y_1, \dots, y_j, \dots, y_n]$  表示潜力  $P_i$  ( $i \in \{1, 2, 3\}$ ) 的  $n$  个指标。每一种潜力都可以建立如下的初始潜力评价矩阵  $S$ :

$$S = \begin{matrix} & y_1 & \cdots & y_j & \cdots & y_n \\ \begin{matrix} k_1 \\ \vdots \\ k_i \\ \vdots \\ k_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1j} & \cdots & y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{i1} & \cdots & y_{ij} & \cdots & y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mj} & \cdots & y_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中,  $y_{ij}$  为用户  $i$  的第  $j$  个指标的值。

该评价矩阵提供了分析问题的基本信息,后续负荷数据的预处理和量化模型的建立都将以此作为分析基础。

### 2.2 指标值预处理

#### 2.2.1 统计平均法

由于不同指标的量纲存在差异,需要对指标进行规范化处理后才能引入量化模型。为了避免不同用户指标值差异过大,造成量化结果的严重扭曲,为此可以采用类似评分法的统计平均法,设定一个百分制平均值  $M$ ,将用户集  $K$  中潜力指标值的均值定位于  $M$ ,具体利用式(9)进行变换。

$$m_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{y}_j}{y_j^{\text{max}} - \bar{y}_j} (1 - M) + M \quad (9)$$

其中,  $\bar{y}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m y_{ij}$ , 为各用户第  $j$  个指标的均值;  $y_j^{\text{max}}$  为各用户第  $j$  个指标的最大值;  $M$  为常数,取值在 50%~75% 之间<sup>[12]</sup>。通过统计平均法将矩阵  $S$  中的  $y_{ij}$  转化为  $m_{ij}$ 。

#### 2.2.2 向量规范化

在经过统计平均法处理后,原始的指标值已经实现了去量纲化和归一化。利用式(10)进一步对统计平均法处理后的数据进行向量规范化。

$$z_{ij} = m_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m m_{ij}^2} \quad (10)$$

向量规范化的变化是线性的,规范化后用户同一指标值的平方和为1。

### 2.3 熵权法求取指标客观权重

多指标决策问题的关键在于解决不同指标之间的矛盾性,因此需引入权重这一概念。权重是不同指标重要性的度量,可以反映指标之间的差异程度以及指标的可靠程度。为保证结果的客观性,本文采用了熵权法原理自适应地求取潜力  $P_i$  不同指标的权重。熵权法是在评价问题中常用的权重确定方法,且广泛应用于电能质量评价<sup>[15]</sup>、网架结构评

价<sup>[16]</sup>等领域,其能够在很大程度上避免人为因素的干扰,克服确定指标权重时主观性过大的缺点,具体步骤如下。

1)对经上述预处理后的潜力评价矩阵按列进行归一化处理,如式(11)所示,每列的 $\sum_{i=1}^m p_{ij} = 1$ 。

$$p_{ij} = z_{ij} / \sum_{i=1}^m z_{ij} \quad (11)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

2)按列计算潜力评价矩阵中第 $j$ 个指标的熵为:

$$e_j = -k^* \sum_{i=1}^m p_{ij} \lg p_{ij} \quad (12)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, n; k^* = \frac{1}{\lg m}$ 。

3)计算潜力评价矩阵中的第 $j$ 个指标的差异系数 $g_j$ 为:

$$g_j = 1 - e_j \quad (13)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, n$ 。差异系数和熵相反,差异系数越大,说明指标之间的差别越大,对决策的作用越大,因此相应的权重就越大。

4)确定权重。第 $j$ 个指标的权重为:

$$\omega_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (14)$$

其中, $j = 1, 2, \dots, n$ 。

最终得到潜力 $P_i$ 经预处理后的加权评价矩阵 $S'$ 为:

$$S' = \begin{matrix} & y_1 & \cdots & y_j & \cdots & y_n \\ \begin{matrix} k_1 \\ \vdots \\ k_i \\ \vdots \\ k_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \omega_1 z_{11} & \cdots & \omega_j z_{1j} & \cdots & \omega_n z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \omega_1 z_{i1} & \cdots & \omega_j z_{ij} & \cdots & \omega_n z_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \omega_1 z_{m1} & \cdots & \omega_j z_{mj} & \cdots & \omega_n z_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

#### 2.4 基于TOPSIS法量化负荷控制潜力

TOPSIS法通过计算各用户的指标值与正、负理想解的相对贴近度,进而得到评估对象的优劣排序。TOPSIS法具有易于理解、计算简便、评估结果合理、应用灵活等特点,已广泛应用于社会经济和工程技术等领域<sup>[17]</sup>。本文基于TOPSIS法计算加权后的评价矩阵 $S'$ 中不同用户的加权指标值与正、负理想解之间的距离,对用户集 $K$ 中各用户的潜力进行排序。

TOPSIS法的思路可以用图1来进行说明,图1表示的是2个指标属性进行决策的问题。图中, $y_1$ 和 $y_2$ 为不同加权的规范化指标,均为效益型指标。用户集 $K$ 中有方案 $k_1 - k_6$ ,根据它们的加权规范化指标值在图中标出了相应的位置,并据此确定正、负理想解。正理想解 $k^*$ 是用户集 $K$ 中并不存在的虚拟最佳用户,它的每个指标的值都是评价矩阵中该指标的

最优值;而负理想解 $k^0$ 是虚拟的最差用户,它的每个指标的值都是评价矩阵中的指标的最差值。在 $n$ 维空间中,将用户集 $K$ 中的每一个用户的加权指标值与正理想解和负理想解的距离进行比较,越靠近正理想解且距离负理想解越远的点,优先级就应该越高。

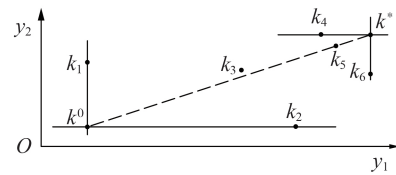


图1 正理想解和负理想解示意图

Fig.1 Schematic diagram of positive ideal solution and negative ideal solution

具体的TOPSIS法量化负荷控制潜力步骤如下。

1)基于加权评价矩阵 $S'$ 确定正理想解 $k^*$ 和负理想解 $k^0$ 。设正理想解 $k^*$ 的第 $j$ 个指标值为 $k_j^*$ ,负理想解 $k^0$ 的第 $j$ 个指标值为 $k_j^0$ 。

针对效益型指标,即数值越大越好的指标,有:

$$\begin{cases} k_j^* = \max \{ \omega_j z_{ij} \} \\ k_j^0 = \min \{ \omega_j z_{ij} \} \end{cases} \quad (15)$$

针对成本型指标,即数值越小越好的指标,有:

$$\begin{cases} k_j^* = \min \{ \omega_j z_{ij} \} \\ k_j^0 = \max \{ \omega_j z_{ij} \} \end{cases} \quad (16)$$

2)计算用户各指标值与正理想解和负理想解之间的距离。

用户 $i$ 的指标值与正理想解之间的距离 $d_i^*$ 为:

$$d_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\omega_j z_{ij} - k_j^*)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

用户 $i$ 的指标值与负理想解之间的距离 $d_i^0$ 为:

$$d_i^0 = \sqrt{\sum_{j=1}^n (\omega_j z_{ij} - k_j^0)^2} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (18)$$

3)计算各用户潜力的综合排序值 $R_i$ 如式(19)所示。

$$R_i = d_i^0 / (d_i^0 + d_i^*) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (19)$$

将计算得到的综合排序值 $R_i$ 作为潜力综合量化值。最终,各用户依据对应的潜力综合量化值 $R_i$ 从大到小排列,反映优劣次序。

基于上述量化模型,最终能够得到3种潜力量化矩阵。参与的用户集 $K = [k_1, \dots, k_i, \dots, k_m]$ ,用向量 $R = [R_1, \dots, R_i, \dots, R_m]$ 表示用户错峰潜力的综合量化值,用向量 $R' = [R'_1, \dots, R'_i, \dots, R'_m]$ 表示用户轮休潜力的综合量化值,用向量 $R'' = [R''_1, \dots, R''_i, \dots, R''_m]$ 表示用户避峰潜力的综合量化值,则潜力量化矩阵为:

$$\begin{matrix} & \text{错时} & \text{轮休} & \text{避峰} \\ \begin{matrix} k_1 \\ \vdots \\ k_i \\ \vdots \\ k_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} R_1 & R'_1 & R''_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_i & R'_i & R''_i \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_m & R'_m & R''_m \end{bmatrix} \end{matrix}$$

### 3 工业用户群体负荷控制潜力画像

画像是建立在大数据的基础上,以真实用户群体为对象,通过定性或定量的方法从数据中提炼抽象出具有显著特征的用户。本文旨在挖掘海量用户数据的价值,尽可能全面细致地勾画出一个用户在负荷控制潜力方面的信息全貌。将用户画像引入用户分析能够解决用户定位不准确、个性化服务不足等问题。

多时间尺度负荷控制潜力指标体系考察的是工业用户在错时、轮休和避峰3个标签下的潜力情况,基于量化模型实现了对3个标签下负荷控制潜力价值的衡量,由此实现了在大用户负荷控制方面对错时潜力、轮休潜力和避峰潜力3个标签的分析。最后,运用聚类分析、统计分析等方法对量化模型结果进行进一步分析,实现对工业用户负荷控制潜力画像结果的呈现。

传统的聚类方法如K-means算法或K中心点算法不能有效确定聚类数,而近邻传播算法是一种基于数据点间的“信息传递”的无监督学习方法<sup>[18]</sup>。近邻传播算法不需要预先指定聚类数目,聚类数目由初始参数的设置决定,其相较于传统方法能够得到以某个原始数据形成的聚类中心以及最佳聚类数目。同时,近邻传播算法比其他聚类方法计算结果误差平方和更小,时间复杂度更低,算法稳定性更好。

因此,本文采用近邻传播算法对由潜力量化值构成的三维矩阵进行聚类。首先,利用2-范数计算潜力量化矩阵中用户*i*和用户*k*潜力的相似性 $s(i, k) = -\|(R_i, R'_i, R''_i) - (R_k, R'_k, R''_k)\|^2$ ,以此构成相似度矩阵。以相似度矩阵作为输入,以所有用户具有相等的概率作为候选的聚类中心,以相似度矩阵对角线上的数值作为聚类中心的选择标准,其值越大,说明该用户越适合作为聚类中心。然后,引入代表度(responsibility)和适用度(availability)这2个重要信息,这2个信息通过算法的迭代进行交换更替。代表度 $r(i, k)$ 从用户*i*的潜力值指向用户*k*的潜力值,表示用户*i*的潜力值适合作为用户*k*的潜力值的类代表点的程度;适用度 $a(i, k)$ 从用户*k*的潜力值指向用户*i*的潜力值,表示用户*k*的潜力值选择用户*i*的潜力值作为类代表点的适用性程度。代表度和适

用度的更新迭代公式为:

$$r(i, k) = s(i, k) - \max_{k' \neq k} \{a(i, k') + s(i, k')\} \quad (20)$$

$$a(i, k) = \min \left\{ 0, r(k, k) + \sum_{i' \neq i, i' \neq k} \max \{0, r(i', k)\} \right\} \quad i \neq k \quad (21)$$

$$a(i, k) = \max_{i' \neq k} \{0, r(i', k)\} \quad i = k \quad (22)$$

以上的迭代公式描述了近邻传播算法的基本思想,为了解决算法有可能出现的振荡(不收敛)问题,在算法中引入阻尼因子 $\lambda$ 。在每一次循环迭代中, $a(i, k)$ 和 $r(i, k)$ 的更新结果都是由当前迭代过程中的更新值和上一步迭代结果加权得到的。假设当前的迭代次数为*t*,则加权公式见式(23)~(25)。

$$r^{(t)}(i, k) = (1 - \lambda) \left( s(i, k) - \max_{k' \neq k} \{a(i, k') + s(i, k')\} \right) + \lambda r^{(t-1)}(i, k) \quad (23)$$

$$a^{(t)}(i, k) = (1 - \lambda) \min \left\{ 0, r(k, k) + \sum_{i' \neq i, i' \neq k} \max \{0, r(i', k)\} \right\} + \lambda a^{(t-1)}(i, k) \quad (24)$$

$$a^{(t)}(k, k) = (1 - \lambda) \sum_{i' \neq k} \max \{0, r(i', k)\} + \lambda a^{(t-1)}(k, k) \quad (25)$$

近邻传播算法流程图<sup>[19]</sup>如附录A图A1所示。

## 4 算例分析

### 4.1 基于本文模型的计算结果

基于江苏省某一地区的实际用户数据进行算例分析,提取62个来自10种不同行业的用户数据,用户的负荷数据从电网公司的营销业务系统中获取,经济数据、温度数据等由政府的相关统计部门提供。对这62个用户按照从1—62的顺序编号,各行业类别的用户数量具体如表2所示。对大用户的负荷特性的分析是实现需求响应潜力计算的基础和前提,通过对负荷数据信息的数据挖掘,能够得到本文模型中所需要的指标初始值。但由于篇幅所限,具体的指标处理过程不再赘述。

表2 用户基本信息

Table 2 Basic customer information

行业类型	用户数	用户编号
采矿业	4	1—4
纺织业	7	11—17
纸制品业	4	23—26
非金属矿物制品业	9	38—46
建筑业	1	57
食品加工业	6	5—10
化学原料和化学制品制造业	11	27—37
批发零售业	6	56, 58—62
木材业	5	18—22
金属制品制造业	9	47—55

选取62个用户的指标初始计算值见附录A

表 A1。

算例的具体计算步骤如下。

1) 指标数据预处理。

根据 2.2 节描述,结合统计平均法和向量规范化法,根据式(9)和式(10),得到预处理后的潜力评价矩阵。

2) 利用熵权法求取指标权重。

利用熵权法分别对错峰潜力、轮休潜力和避峰潜力评价矩阵求取指标权重,具体步骤如式(11)~(14)所示。最终得到的 3 种潜力指标权重如下:错峰潜力指标  $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{12}$ 、 $\alpha_{13}$  和  $\alpha_4$  的权重分别为 0.094 1、0.007 9、0.861 9 和 0.036 1;轮休潜力指标  $\alpha_{21}$ 、 $\alpha_{22}$  和  $\alpha_4$  的权重分别为 0.054 6、0.810 7 和 0.134 7;避峰潜力指标  $\alpha_{31}$ 、 $\alpha_{32}$ 、 $\alpha_{33}$  和  $\alpha_4$  的权重分别为 0.521 5、0.253 3、0.044 5 和 0.180 7。

3) 量化负荷控制潜力。

根据 2.3 节的量化潜力的过程,对 3 种潜力指标赋权后的评价矩阵进行量化处理,最终得到负荷控制潜力综合量化值如附录 A 表 A2 所示。

#### 4.2 工业用户群体负荷控制潜力画像

对于每一种潜力而言,用户潜力量化值越高,参与响应的负荷控制的潜力就越大。根据表 A2 的结果,可以将 62 个工业用户的潜力值按大小分别进行排序,结果如图 2 所示。

采用常用的 K-means 聚类算法实现对潜力值的

分类,规定聚类类别数为 3,并将聚类中心的结果作为高等、中等和低潜力的划分依据,结果表明:错峰潜力中,高错峰潜力综合量化值大于 0.9,中等错峰潜力综合量化值为 0.7~0.9,低错峰潜力综合量化值小于 0.7;轮休潜力中,高轮休潜力综合量化值大于 0.8,中等轮休潜力综合量化值为 0.7~0.8,低轮休潜力综合量化值小于 0.7;避峰潜力中,高避峰潜力综合量化值大于 0.6,中等避峰潜力综合量化值为 0.4~0.6,低避峰潜力综合量化值小于 0.4。因此,在进行相应的负荷控制时,应优先考虑高潜力的用户,将排名结果作为制定负荷控制实施方案的依据。

下面以错峰、轮休和避峰潜力最大的用户 20、用户 33 和用户 60 为例进行具体分析。绘制用户 20、33、60 的典型工作日和典型周末日的负荷曲线如图 3 所示。

用户 20 属于木材业,从图 3(a)可知,该用户的负荷在一天范围内的波动比较大,峰谷差率也比较大。在用电高峰时段(11:00—15:00)负荷值较大,同时在用电高峰时段前后的用电负荷较小,因此可以很好地将用电负荷进行转移,符合高错峰潜力特征。用户 33 属于化学原料和化学制品制造业,该行业的用电负荷通常比较大,且连续性比较强,不受时段、季节或者气候的影响。从图 3(b)可以看出,该用户周末和工作日的负荷差异显著,符合高轮休潜力特征。用户 60 属于批发零售业,该行业主要的负

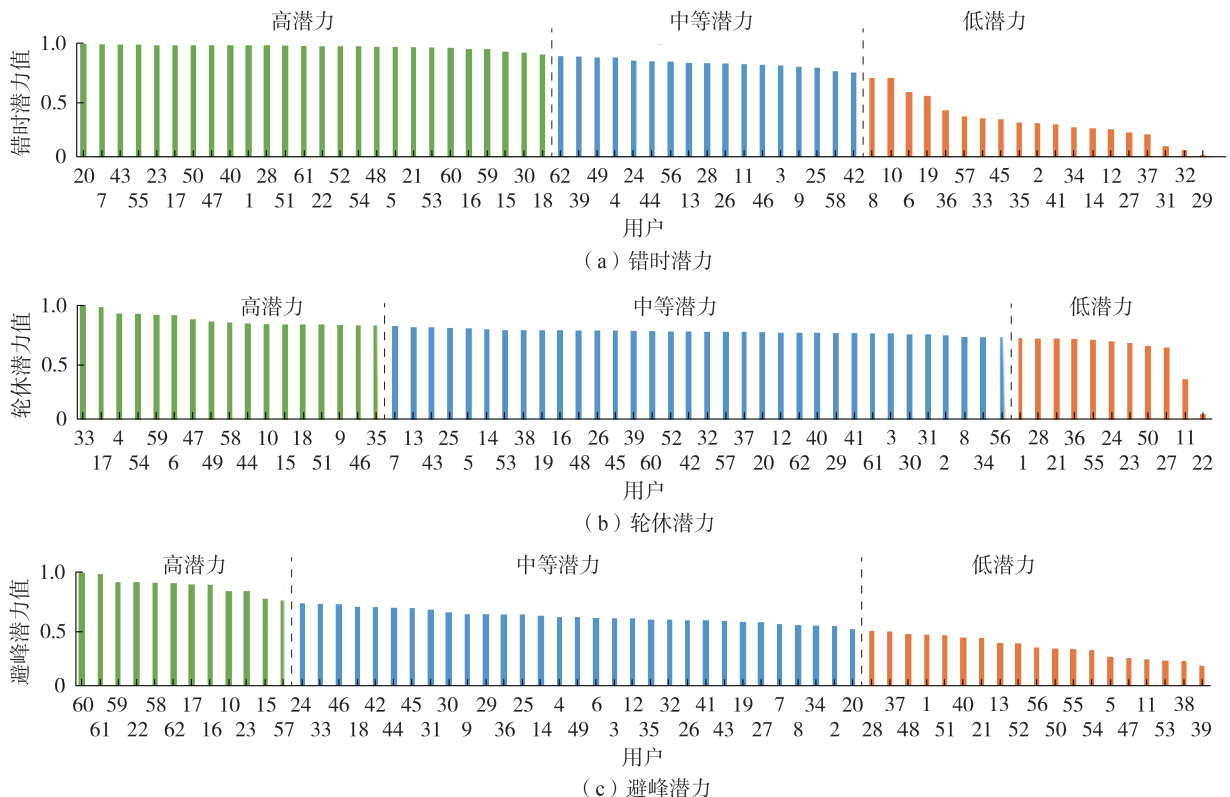


图 2 潜力综合量化值

Fig.2 Potential comprehensive quantitative values

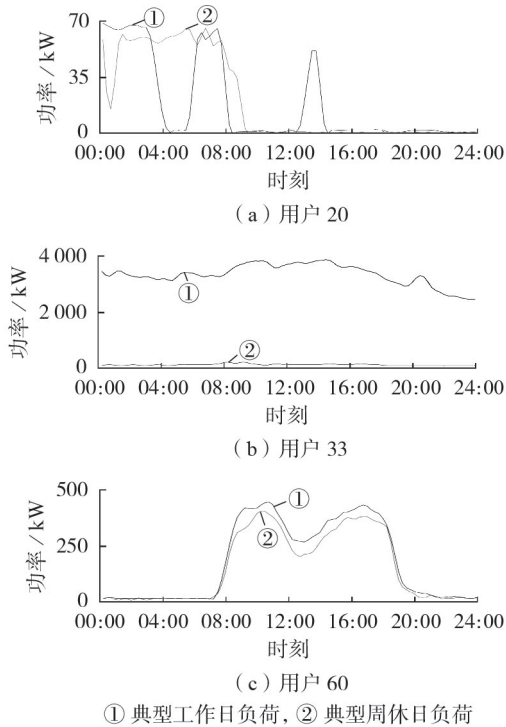


图3 典型用户负荷曲线  
Fig.3 Load curves of typical customers

荷是空调和照明负荷等。从图3(c)可知,该用户在全省用电高峰时段(11:00—15:00)的用电负荷较大,有拾峰趋势。因此,可以在用电高峰时期,安排减少空调的使用,有高避峰潜力。

进一步地,基于附录A表A2求得的潜力综合量化值,利用近邻传播算法进行聚类,最终得到62个用户的聚类结果如图4所示,聚类中心的错时、轮体和避峰潜力的具体量化值如图5所示。

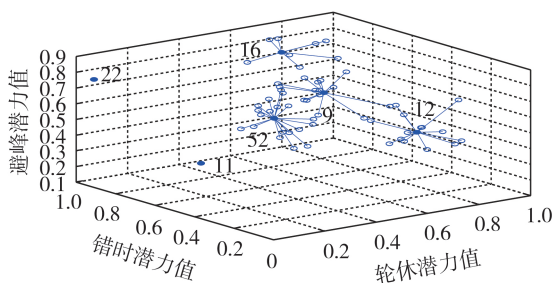


图4 聚类结果  
Fig.4 Clustering results

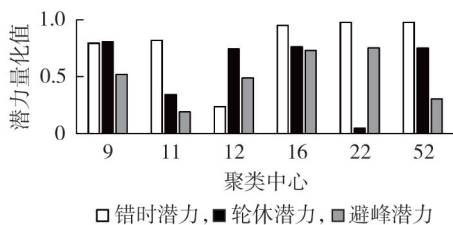


图5 聚类中心潜力量化值

Fig.5 Potential quantification value of clustering centers

依据潜力综合量化值的大小,设置“高潜力”、“中等潜力”、“低潜力”3个档次,得到9个潜力特征标签。最终的聚类结果及每类的画像特征标签结果如附录A表A3所示,实现了对工业用户群体的负荷控制潜力画像。

通过对3种潜力进行聚类分析,将算例中的工业用户群体聚类成6个特征组别,每一个特征组别中的用户具有共性标签特征。选取6个特征组别的聚类中心,绘制在典型工作日的负荷曲线(实线)以及典型周休日的负荷曲线(虚线),如图6所示。

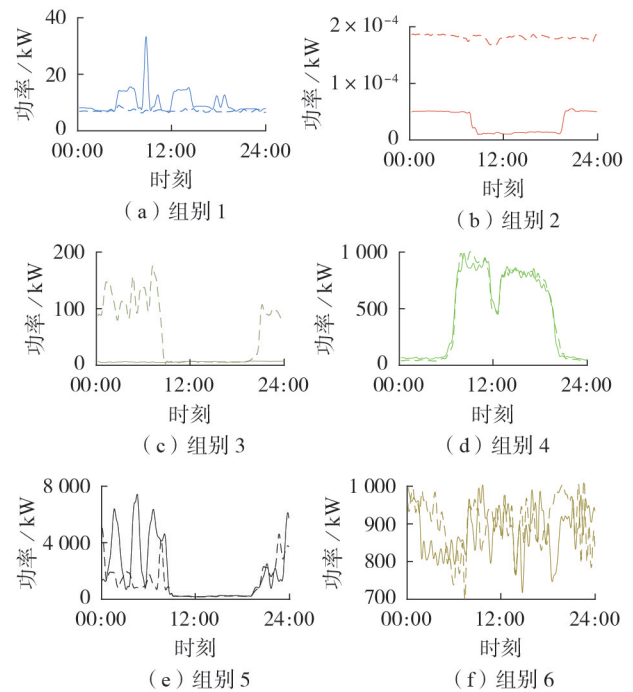


图6 不同组别聚类中心负荷曲线  
Fig.6 Load curves of clustering centers in different groups

由图6可以看出,不同组别的聚类中心用户的工作日负荷特性以及工作日和周休日负荷特性之间都存在很大的差异。具体而言,聚类组别4以用户16作为聚类中心,由表2所示的用户基本信息可知,该用户组主要包括的行业类别有纺织业和批发零售业。绘制该类别的9个用户在典型工作日以及典型周休日的曲线,结果如附录A图A2所示。

聚类组别4的特征为中等轮休潜力、中等错时潜力和高避峰潜力。由图A2可以看出这些用户在全省用电负荷的高峰时段(11:00—15:00)的负荷水平较高,有较大避峰负荷,同时迎峰特征明显。除此之外,纺织业和批发零售业在夏季主要负荷是空调负荷,因此避峰潜力较大。在制定负荷控制计划时,优先安排这一类用户参与避峰,可提高负荷控制的执行效率。

算例结果表明,本文提出的画像方法能够有效

地区分不同负荷控制潜力的用户,进一步地,说明本文提出的负荷控制潜力量化模型具有较高的可靠性。

因此,通过聚类形成工业用户群体负荷控制潜力画像的应用价值体现在可以把握用户群体特征,帮助负荷控制实施方快速定位潜在负荷控制参与用户,提高负荷控制执行效率,并有效保证所选用户群体的高参与率,减少用户响应的不确定性。

## 5 结论

本文对工业用户群体负荷控制潜力的评估问题进行了研究,选取相应指标组成包含错时潜力、轮休潜力和错峰潜力3种潜力的多时间尺度负荷控制潜力指标体系。本文提出基于信息熵与TOPSIS法相结合的量化模型,构建负荷控制潜力量化模型,计算得到用户参与不同负荷控制方式的潜力量化值。采用近邻传播算法完成对工业用户群体负荷控制潜力的画像,根据实际的应用需要,在工业用户群体数量较多的情况下,本文所提的画像方法仍然适用。

实例分析的结果表明,本文所提的基于负荷控制潜力量化模型的工业用户群体画像方法能够对用户进行数据化、精细化管理,准确评估不同用户参与不同类型负荷控制的潜力,衡量不同用户适合参与的负荷控制类型,针对具体的负荷控制措施筛选出符合要求的用户,为后续负荷控制的评估和实施提供了可靠的方案选择依据。

然而,本文构建的指标体系不是很全面,涉及的指标数量还较少,后续的研究工作将在获取更全面数据的基础上,拓展指标体系内容,使得该模型能够更全面地刻画用户的负荷控制潜力画像。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] LI Y, SHEN Y, ZHOU L, et al. Progressive Time-differentiated Peak Pricing (PTPP) for aggregated air-conditioning load in demand response programs[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(1): e2664.1-e2664.16.
- [2] 彭春华, 张金克, 陈露, 等. 计及差异化需求响应的微电网源荷储协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 1-7. PENG Chunhua, ZHANG Jinke, CHEN Lu, et al. Source-load-storage coordinated optimal scheduling of microgrid considering differential demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 1-7.
- [3] 沈运帷, 李扬, 高赐威, 等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 151-161. SHEN Yunwei, LI Yang, GAO Ciwei, et al. Application of demand response in ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 151-161.
- [4] 王蓓蓓, 李扬. 面向智能电网的电力需求侧管理规划及实施机制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 19-24. WANG Beibei, LI Yang. Demand side management planning and implementation mechanism for smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 19-24.
- [5] 李扬, 陈玉辰, 王子健, 等. 市场竞争机制下用户用电行为特性辨识模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 92-98. LI Yang, CHEN Yuchen, WANG Zijian, et al. Identification model of users' electricity consumption behaviour characteristics under market completion mechanism[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 92-98.
- [6] 郝然, 艾苒, 肖斐. 基于多元大数据平台的用电行为分析构架研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 20-27. HAO Ran, AI Qian, XIAO Fei. Architecture based on multivariate big data platform for analyzing electricity consumption behaviour[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 20-27.
- [7] 李彬, 曹望璋, 崔高颖, 等. 基于二次分组的避峰负荷优化调控方法[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3904-3911. LI Bin, CAO Wangzhang, CUI Gaoying, et al. Dispatching approach for optimized peak averting based on secondary round grouping[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3904-3911.
- [8] 陆婷婷, 高赐威, 苏卫华, 等. 有序用电避峰预案优化编制方法研究[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2315-2321. LU Tingting, GAO Ciwei, SU Weihua, et al. Research on drafting of optimal peak averting planning for ordered power utilization[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2315-2321.
- [9] 王芃, 文福拴, 王斐, 等. 基于混合多属性评价的错峰用电预案编制方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 54-61, 70. WANG Peng, WEN Fushuan, WANG Fei, et al. A hybrid multiple-attribute evaluation based scheduling method for peak load shifting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 54-61, 70.
- [10] 徐青山, 丁一帆, 颜庆国, 等. 大用户负荷调控潜力及价值评估研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6791-6800, 7070. XU Qingshan, DING Yifan, YAN Qingguo, et al. Research on evaluation of scheduling potentials and values on large consumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6791-6800, 7070.
- [11] 国家发展改革委. 有序用电管理办法(发改运行(2011)832号)[EB/OL]. [2011-04-21]. [http://sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2011tz/t20110428\\_408768.html](http://sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2011tz/t20110428_408768.html).
- [12] 岳超源. 决策理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 131-148.
- [13] 陈雷, 王延章. 基于熵权系数与TOPSIS集成评价决策方法的研究[J]. 控制与决策, 2003(4): 456-459. CHEN Lei, WANG Yanzhang. Research on TOPSIS integrated evaluation and decision method based on entropy coefficient[J]. Control and Decision, 2003(4): 456-459.
- [14] LIU F, ZHANG W. TOPSIS-based consensus model for group decision-making with incomplete interval fuzzy preference relations[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 44(8): 1283-1294.
- [15] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 156-159, 164. OUYANG Sen, SHI Yili. A new improved entropy method and its application in power quality evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 156-159, 164.
- [16] 梁海平, 田圣双, 李秋燕, 等. 基于改进TOPSIS灰色关联投影法的主网网架结构评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 63-69. LIANG Haiping, TIAN Shengshuang, LI Qiuyan, et al. Main grid structure evaluation based on improved TOPSIS grey relation projection method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 63-69.
- [17] 李艳梅, 陈增. 基于联系度优化TOPSIS法的区域电能替代潜力评估研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 687-695.



LI Yanmei, CHEN Zeng. Study on regional electric energy substitution potential evaluation based on TOPSIS method of optimized connection degree power system technology[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 687-695.

[18] FREY B J, DUECK D. Clustering by passing messages between data points[J]. Science (New York, N.Y.), 2007, 315(5814): 972-976.

[19] 肖宇, 于剑. 基于近邻传播算法的半监督聚类[J]. 软件学报, 2008(11): 2803-2813.  
XIAO Yu, YU Jian. Semi-supervised clustering based on affinity propagation algorithm[J]. Journal of Software, 2008(11): 2803-2813.

#### 作者简介:



陈逸涵

陈逸涵(1997—),女,江苏盐城人,硕士研究生,主要研究方向为需求侧管理(E-mail: 220182636@seu.edu.cn);

李 扬(1961—),男,江苏泰兴人,教授,博士,主要研究方向为需求侧管理(E-mail: li\_yang@seu.edu.cn);

沈运帷(1992—),女,江苏泰州人,博士研究生,主要研究方向为需求侧管理和电力市场(E-mail: shenywee@seu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

## Industrial customer group portrait method based on potential quantization model of load control

CHEN Yihan, LI Yang, SHEN Yunwei

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Under the background of the power system reform in China, research on exploiting the potential of industrial customer load to participate in load control is necessary to enable the safe and stable operation of power grid. The electricity consumption characteristics under different time measurements are fully extracted based on the load data of industrial customers. A multi-time scale load control potential index system is constructed from three aspects: off-time potential, rest potential and peak avoidance potential. Then, the potential quantization model of load control is developed to provide the value assessment of control potential by combining information entropy and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Moreover, the affinity propagation algorithm is employed to analyze the quantization model results, and the customers are clustered according to the potential quantization value to provide the classification of different customer characteristic groups. Finally, an example based on the actual load data of industrial customer in a certain region is conducted to present the load control potential quantization portrait results of industrial customer group.

**Key words:** load control; potential evaluation; industrial customer; quantization model; affinity propagation algorithm; customer portrait

## 附录 A

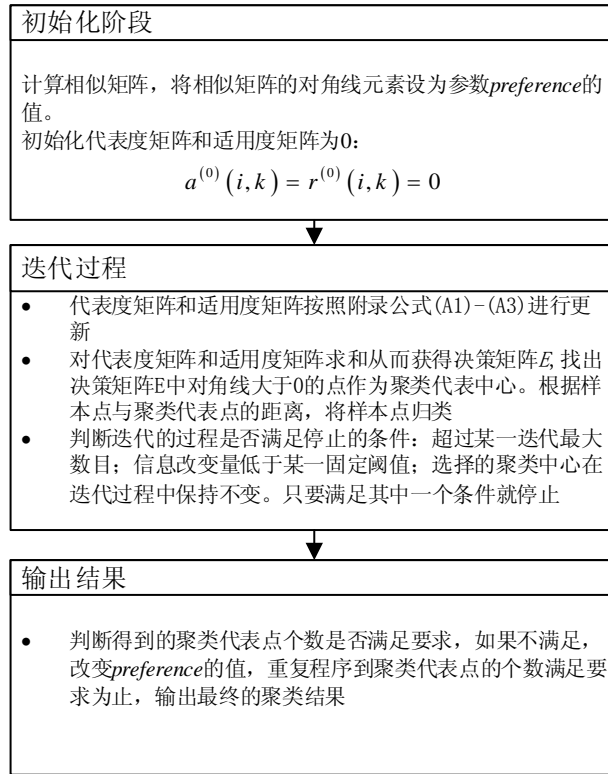


图 A1 近邻传播算法流程图

Fig.A1 Flowchart of affinity propagation algorithm

表 A1 负荷控制潜力指标初始值

Table A1 Initial value of load control potential index

用户	轮休潜力			错时潜力			错峰潜力				
	轮休负荷	轮休负荷下降率	单位电量成本	波动率	错时负荷	峰谷差率	单位电量成本	峰时平均负荷差异系数	最大负荷与温度相关性	错峰负荷	单位电量成本
1	3.152679	0.523654	0.64	1.507917	0.1	0.982796	0.64	-0.1427	0.109383	0.1	0.64
2	54.57842	0.561951	0.64	0.122109	14	0.325581	0.64	-0.08594	0.182312	14	0.64
3	111.4052	0.584977	0.64	0.310678	223.3	0.814734	0.64	-0.00143	0.096144	250.4	0.64
4	4.666815	0.837656	0.64	0.535036	-2.6	0.882353	0.64	0.027718	0.013966	3.4	0.64
5	165.6893	0.650566	0.973	0.913341	-4.6	0.975134	0.973	-0.39177	0.150601	32.6	0.973
6	718.4432	0.817756	0.973	0.172398	362	0.591579	0.973	-0.00051	0.104146	399	0.973
7	4.428571	0.677596	0.973	1.31539	0	1	0.973	-0.072	0.189386	0	0.973
8	231.5997	0.542046	0.973	0.329651	-106	0.709709	0.973	-0.07122	0.162367	88	0.973
9	4.510119	0.689084	0.973	0.399988	7.6	0.804805	0.973	0.049327	0.038359	7.9	0.973
10	769.2262	0.704296	0.973	0.387592	115	0.708429	0.973	0.269734	0.045658	1554	0.973
11	13.44196	0.002575	4.752	0.59889	-277	0.826802	4.752	-0.36987	0.021083	26	4.752
12	380.0997	0.595128	4.752	0.071438	56	0.275827	4.752	-0.00615	0.122227	226	4.752
13	216.2942	0.663764	4.752	0.546679	51	0.836862	4.752	-0.26253	0.268459	143	4.752
14	734.6131	0.636444	4.752	0.050019	10	0.285714	4.752	-0.03283	0.318496	270	4.752

续表

用户	轮休潜力			错时潜力			错峰潜力				
	轮休负荷	轮休负荷 下降率	单位电量 成本	波动率	错时负荷	峰谷差率	单位电 量成本	峰时平均负 荷差异系数	最大负荷与 温度相关性	错峰负 荷	单位电量 成本
15	4920.762	0.701495	4.752	0.345934	730	0.937727	4.752	0.122542	0.226027	10624	4.752
16	218.9777	0.624359	4.752	0.79798	-98	0.958871	4.752	0.297951	0.116883	701.2	4.752
17	19.63467	0.923189	4.752	1.05449	-3.2	1	4.752	0.399189	0.021505	58.6	4.752
18	316.2501	0.700723	2.215	0.720185	-452	0.909286	2.215	0.118102	0.028275	381	2.215
19	1769.951	0.627158	2.215	0.092436	1080	0.558261	2.215	-0.00953	0.004543	3040	2.215
20	7.491518	0.600236	2.215	1.452108	18.9	1	2.215	-0.0814	0.119218	19.6	2.215
21	50.26548	0.52121	2.215	0.407305	-19.1	1	2.215	-0.15936	0.070179	78.4	2.215
22	-5.3317	-0.5047	2.215	0.714597	0	1	2.215	0.202845	0.45445	1.4	2.215
23	2.903869	0.463273	0.947	1.069918	-4	1	0.947	0.275049	0.035428	14.8	0.947
24	4718.233	0.481532	0.947	0.345806	280	0.855987	0.947	0.147032	0.032293	14580	0.947
25	1851.632	0.65439	0.947	0.253436	740	0.796748	0.947	0.045958	0.029782	2720	0.947
26	242.7158	0.621719	0.947	0.531464	383	0.831731	0.947	-0.06811	0.292111	383	0.947
27	42074.09	0.405233	27.06	0.066351	2100.2	0.250246	27.06	-0.0218	0.115946	2113.6	27.06
28	14.7756	0.523399	27.06	1.646654	-1.1	0.981818	27.06	-0.08681	0.105832	10.8	27.06
29	76877.23	0.591911	27.06	0.01047	300	0.048482	27.06	-0.01003	0.321877	2000	27.06
30	40.28289	0.574653	27.06	0.567915	37.6	0.925338	27.06	0.072811	0.057692	88.4	27.06
31	2919.1	0.571969	27.06	0.034255	-320	0.131325	27.06	0.04243	0.250241	620	27.06
32	3186.628	0.606008	27.06	0.026054	-230	0.09995	27.06	-0.01466	0.166789	209.8	27.06
33	1678.315	0.979221	27.06	0.11141	210	0.367188	27.06	0.104028	0.184646	1290	27.06
34	896.4881	0.540378	27.06	0.09656	0	0.291188	27.06	-0.03195	0.02935	190	27.06
35	3407.405	0.687637	27.06	0.072436	-113	0.332795	27.06	-0.01228	0.157781	1620	27.06
36	138.026	0.520687	27.06	0.094563	-14.9	0.436211	27.06	0.022037	0.175349	76.7	27.06
37	13026.34	0.603824	27.06	0.123511	-100	0.233429	27.06	-0.09702	0.124027	0	27.06
38	44828.96	0.629052	32.79	0.283369	55670	0.834367	32.79	-0.34685	0.112001	56875	32.79
39	14797.4	0.61837	32.79	0.663745	395	0.89072	32.79	-0.37775	0.0679	775	32.79
40	71.91994	0.594095	32.79	1.268402	-31.4	0.987063	32.79	-0.1642	0.218052	10.4	32.79
41	184.0536	0.58919	32.79	0.072261	-6	0.315217	32.79	0.012188	0.036966	96	32.79
42	423.1369	0.608366	32.79	0.255109	-100	0.756983	32.79	0.098775	0.127192	735	32.79
43	51.85699	0.664248	32.79	1.597125	-22.5	0.989011	32.79	-0.0043	0.094965	27	32.79
44	6.548363	0.71087	32.79	0.499326	0.4	0.850993	32.79	0.077705	0.181139	10.5	32.79
45	561.1271	0.622306	32.79	0.113402	-12.7	0.360965	32.79	0.064435	0.218206	300	32.79
46	2.518452	0.690268	32.79	0.428444	-2.8	0.821138	32.79	0.15347	0.039092	4.6	32.79
47	10607.13	0.762589	4.174	1.092002	1	0.991577	4.174	-0.36294	0.072933	60	4.174
48	185.6222	0.621788	4.174	0.891104	208.3	0.980222	4.174	-0.12099	0.057507	266.3	4.174
49	16.80491	0.733453	4.174	0.791262	-1.2	0.883669	4.174	0.027931	0.018612	11.2	4.174
50	39.04762	0.424562	4.174	1.093088	54	0.992119	4.174	-0.24386	0.002958	85.5	4.174
51	1926.628	0.69699	4.174	0.907859	1233	1	4.174	-0.16154	0.18482	1530	4.174
52	790.4091	0.607178	4.174	1.149746	-47.3	0.978431	4.174	-0.217	0.113707	6.7	4.174

续表

用户	轮休潜力			错时潜力			错峰潜力				
	轮休负荷	轮休负荷 下降率	单位电量 成本	波动率	错时负荷	峰谷差率	单位电 量成本	峰时平均负 荷差异系数	最大负荷与 温度相关性	错峰负 荷	单位电量 成本
53	23547.19	0.628302	4.174	0.713605	-1100	0.974845	4.174	-0.45181	0.120967	8260	4.174
54	1197.956	0.835061	4.174	1.142585	64	0.977723	4.174	-0.26125	0.014516	185	4.174
55	741.2396	0.503609	4.174	1.248079	-74	0.993185	4.174	-0.26876	0.118192	245	4.174
56	172.5729	0.54444	82.8	0.279169	-139	0.849145	82.8	-0.18943	0.113887	194	82.8
57	48.875	0.605397	43.18	0.132274	24	0.384615	43.18	0.092807	0.373782	60	43.18
58	104.0357	0.726615	43.18	0.515374	3	0.765517	43.18	0.263941	0.270506	255	43.18
59	169.3281	0.825963	43.18	0.82037	-86	0.95786	43.18	0.414534	0.077179	442.8	43.18
60	74.51935	0.615379	43.18	0.968808	-126	0.966518	43.18	0.323155	0.352519	249	43.18
61	27.07396	0.587621	43.18	0.911825	7	1	43.18	0.450683	0.190423	120	43.18
62	82.08125	0.597069	43.18	0.66434	234	0.894118	43.18	0.290583	0.204268	359.2	43.18

表 A2 负荷控制潜力综合量化值

Table A2 Comprehensive quantitative value of load control potential

用户	轮休潜力	错时潜力	错峰潜力	用户	轮休潜力	错时潜力	错峰潜力
1	0.69324	0.98132	0.36901	32	0.74784	0.05489	0.47908
2	0.71892	0.29109	0.43270	33	0.97609	0.33455	0.59285
3	0.73437	0.80227	0.48901	34	0.70381	0.25488	0.43515
4	0.90320	0.87278	0.49678	35	0.80247	0.29847	0.47929
5	0.77833	0.96651	0.21109	36	0.69060	0.40686	0.51515
6	0.89004	0.56965	0.49136	37	0.74649	0.19436	0.39351
7	0.79644	0.99017	0.44631	38	0.76343	0.82224	0.17941
8	0.70557	0.69333	0.44116	39	0.75601	0.88197	0.14594
9	0.80413	0.79240	0.51973	40	0.73958	0.98154	0.35061
10	0.81433	0.69215	0.68608	41	0.73630	0.28002	0.47281
11	0.34413	0.81597	0.19139	42	0.74914	0.74223	0.57027
12	0.74112	0.23892	0.48839	43	0.78649	0.98679	0.46989
13	0.78713	0.82616	0.31058	44	0.81758	0.84040	0.56517
14	0.76883	0.24926	0.50815	45	0.75847	0.32801	0.56208
15	0.81249	0.92523	0.62996	46	0.80386	0.80932	0.59157
16	0.76072	0.95056	0.73112	47	0.85350	0.98166	0.20180
17	0.95824	0.98296	0.73612	48	0.75901	0.97001	0.37590
18	0.81192	0.90133	0.57256	49	0.83379	0.87560	0.49630
19	0.76265	0.53468	0.46338	50	0.62669	0.98196	0.26982
20	0.74458	0.99382	0.42258	51	0.80943	0.97893	0.36592
21	0.69157	0.96530	0.34702	52	0.74922	0.97315	0.30568
22	0.04895	0.97363	0.75006	53	0.76365	0.96256	0.18296
23	0.65273	0.98340	0.68529	54	0.90149	0.97242	0.25795
24	0.66501	0.84477	0.59697	55	0.67974	0.98626	0.26759
25	0.78092	0.78346	0.51513	56	0.70334	0.83683	0.27729
26	0.75900	0.82079	0.47294	57	0.74662	0.35278	0.61740
27	0.61335	0.21195	0.46130	58	0.82727	0.75189	0.74667
28	0.69242	0.98018	0.39928	59	0.89226	0.94939	0.75019
29	0.73888	0.00986	0.51913	60	0.75328	0.95918	0.81652
30	0.72679	0.91592	0.53280	61	0.73474	0.97778	0.80861
31	0.72502	0.08748	0.55191	62	0.74105	0.88534	0.74336

表 A3 画像特征标签结果  
Table A3 Portrait feature tag results

用户组别	聚类中心	用户构成	画像结果
1	用户 9	用户 3、4、6、8—10、	高轮休潜力
		18、19、24—26、30、 42、44、46、49	中等错时潜力 中等避峰潜力 低轮休潜力
2	用户 11	用户 11	中等错时潜力 低避峰潜力
3	用户 12	用户 2、12、14、27、	中等轮休潜力
		29、31—37、41、45、 57	低错时潜力 中等避峰潜力
4	用户 16	用户 15—17、23、	中等轮休潜力
		58—62	中等错时潜力 高避峰潜力 低轮休潜力
5	用户 22	用户 22	高错时潜力 高避峰潜力
6	用户 52	用户 1、5、7、13、20、	中等轮休潜力
		21、28、38—40、43、 47、48、50—56	高错时潜力 低避峰潜力

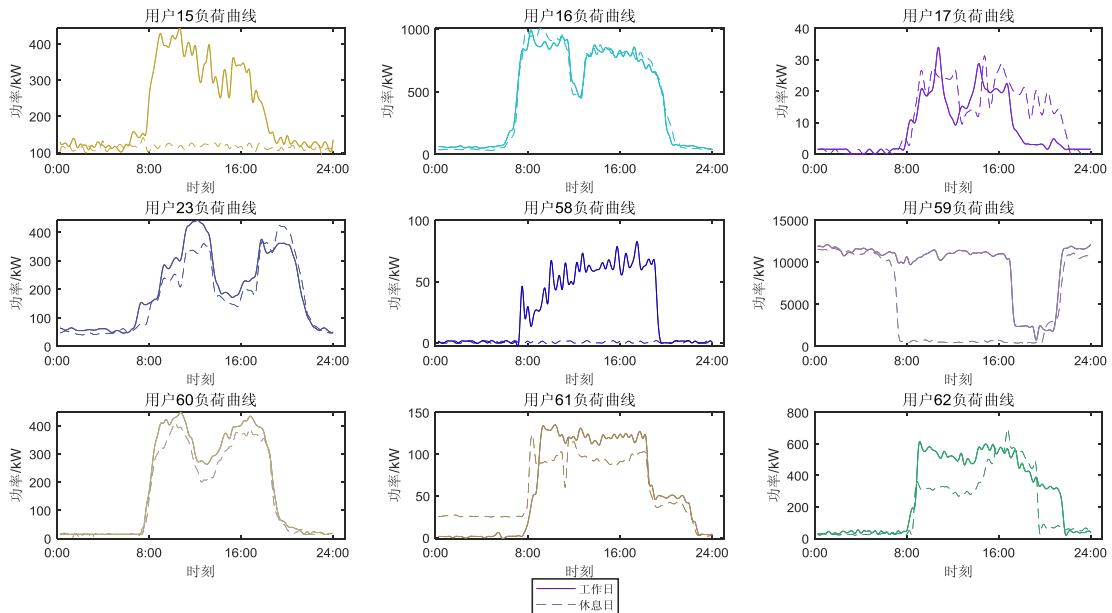


图 A2 第四组别用户的负荷曲线  
Fig.A2 Load curve of 4th group of users