

# 基于烟花算法优化K均值聚类的家电负荷需求响应潜力评估

刘乐, 张显杉, 钱堃, 范晋衡, 关华冠

(广东电网有限责任公司广州供电局, 广东 广州 510000)

**摘要:** 为了提高负荷需求响应潜力评估精度, 提出一种基于烟花算法优化K均值聚类的家电负荷需求响应潜力评估方法。以用户各时段参与需求响应时的最大削减功率为输入量, 负荷需求响应潜力为输出量, 采用烟花算法进行训练, 确定K均值聚类的初始聚类中心, 采用烟花算法确定K均值聚类的初始聚类中心, 对局部记忆性弹性负荷需求响应潜力进行了估算, 采用空调负荷需求响应潜力为例进行算例分析。结果表明, 高峰时段空调负荷需求响应潜力占台区总负荷的19.6%–29.9%, 需求响应潜力较大。

**关键词:** 家电负荷; 需求响应潜力; 烟花算法; K均值聚类

中图分类号: TP183; TP391 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)06-0185-04

## Evaluation of the Response Potential of Household Electrical Appliances Load Demand Based on Fireworks Algorithm Optimized K-means Clustering

LIU Le, ZHANG Xian-shan, QIAN Kun, FAN Jin-heng, GUAN Hua-guan

(Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of load demand response potential evaluation, a method for evaluating the load demand response potential of household appliances based on fireworks algorithm optimization K-means clustering is proposed. With the maximum curtailed power of users participating in demand response in each period as the input and the load demand response potential as the output, fireworks algorithm is used for training to determine the initial clustering center of K-means clustering. The fireworks algorithm is used to determine the initial cluster center of K-means clustering, and the local memory elastic load demand response potential is estimated. The air conditioning load demand response potential is taken as an example for calculation and analysis. The results show that the air conditioning load demand response potential during peak hours accounts for 19.6%-29.9% of the total load in transformer district, and the demand response potential is large.

**Keywords:** household appliance load; demand response potential; fireworks algorithm; K-means clustering

### 0 引言

随着我国经济的飞速发展, 我国对电能需求量越来越大, 但在某些地区, 电能需求量无法得到满足, 就会出现“拉闸限电”的现象, 这种措施并不能从根本上解决用电高峰期的电能缺口问题, 还会影响人们的正常生活<sup>[1-3]</sup>。负荷需求响应评估能够了解用户负荷需求, 引导用户改变用电习惯, 降低用电成本, 因此对负荷需求响应潜力进行评估具有重要意义<sup>[4-6]</sup>。

文献[7]在对电价灵敏度分析的基础上, 建立了基于K均值聚类的需求响应潜力评估模型, 利用该模型对价格弹性地区的负荷需求响应潜力进行了估算。文献[8]对工业用户的需求响应意愿特征进行了提取, 利用高斯过

程回归建立了响应评估模型, 并采用实际算例对模型的正确性进行了验证。文献[9]对用户参与需求响应的影响因素进行了分析, 并提取了其中的关键因素, 建立了基于自适应神经网络的需求响应潜力评估模型, 采用实际算例验证了模型的有效性。目前, 需求响应评估模型的研究对象多为工、商业负荷<sup>[10-11]</sup>, 针对居民负荷需求响应评估模型还有待进一步研究。

基于此, 本文对家电负荷的需求响应潜力进行分析, 在此基础上提出了一种基于烟花算法优化K均值聚类的家电负荷需求响应潜力评估模型, 采用该方法对空调负荷的需求响应潜力值进行了计算。

### 1 算法介绍

#### 1.1 烟花算法

烟花算法(fireworks algorithm, FWA)是一种新型

\*基金项目: 广州供电局第一批管理创新项目(030116KK52220008)

收稿日期: 2024-01-17

群体智能优化算法,其本质是对烟花爆炸产生火花过程的模拟,烟花在燃放时产生火花,火花在搜索空间中不断更新位置,直到找到最优位置<sup>[12]</sup>。

在烟花算法中,参数爆炸半径和烟花爆炸产生的火花个数,对烟花算法的优化效果起决定性作用,计算公式如下:

$$R_i = \hat{R} \frac{f - f_{\min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f - f_{\min}) + \varepsilon} \quad (1)$$

$$S_i = M \frac{f_{\max} - f + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f_{\max} - f) + \varepsilon} \quad (2)$$

式中, $R_i$ 为第*i*个烟花的爆炸半径; $f$ 为适应度函数; $f_{\min}$ 、 $f_{\max}$ 分别为的最小值和最大值; $\hat{R}$ 为烟花爆炸半径的平均值; $\varepsilon$ 为最小机器量; $S_i$ 为第*i*个烟花爆炸的产生的火花个数; $N$ 为烟花种群规模; $M$ 为常数。

式(2)中 $S_i$ 受到下列约束:

$$S_i = \begin{cases} \text{round}(aW), & s_i < aW \\ \text{round}(aW), & s_i < bW \\ \text{round}(s_i), & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\text{round}()$ 为取整函数; $W$ 为权值; $s_i$ 为烟花初始个数; $a$ 、 $b$ 为常数,取值分别为0.1和0.5。

令烟花位置为 $x_i(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik})$ ,其中*k*为烟花维度,通过式(1)和式(2)对爆炸半径和产生的火花个数进行计算,并对烟花位置进行更新,产生爆炸火花,具体如下:

$$x'_{ik} = x_{ik} + r_i U(-1, 1) \quad (4)$$

式中, $x_{ik}$ 为*k*维中第*i*个烟花的位置; $x'_{ik}$ 为 $x_{ik}$ 更新后的位置; $r_i$ 为第*i*个烟花的缩放参数; $U(-1, 1)$ 为常数,取值区间为 $(-1, 1)$ 。

烟花在爆炸过程中可能会出现越界现象,对于越界的烟花应当进行处理,本文采用映射规则对其进行分配,公式如下:

$$\hat{x} = x_{lb,k} + \left| x_{ik} \right| \left\| x_{ub,k} - x_{lb,k} \right\| \quad (5)$$

式中, $\hat{x}$ 为下一代烟花的位置; $x_{lb,k}$ 为*k*维中第*i*个烟花的位置; $x_{ub,k}$ 为*k*维的上界; $x_{lb,k}$ 为*k*维的下界; $u$ 为位置分量 $1 \leq u \leq w$ , $l$ 为位置分量, $l=1, 2, \dots, u$ ;  $\|\cdot\|$ 表示模运算。

为了增加烟花种群多样性,在烟花算法中引入高斯变异算子,可以生成高斯火花。具体实施过程为:随机选择一个火花 $x_i$ ,选择在特定维度中进行变异,执行相应计算,即

$$\hat{x} = x_{ik} e \quad (6)$$

式中, $e$ 与 $N(1, 1)$ 等价, $N(1, 1)$ 表示高斯随机常数,其平均值和方差均为1。

## 1.2 K均值聚类

K均值聚类法(K-means Clustering)是MacQueen等人提出的一种聚类算法<sup>[13]</sup>,其基本原理是相似性规则,因为同类簇的对象是相似的,而不同类簇的对象相似性较小。K均值聚类法划分簇类的标准是欧氏距离,计算公式如下:

$$d(X, Y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

式中, $d(X, Y)$ 为*X*与*Y*之间的欧氏距离; $x_i, y_i$ 均为数据样本, $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ , $i \in [1, n]$ 。

利用K均值聚类法进行聚类时,每进行一次迭代,需要对聚类中心点进行重新计算,并更新簇,其计算公式如下:

$$C_i = \frac{1}{|c_i|} \sum_{x \in c_i} x_i \quad (8)$$

式中, $C_i$ 为簇; $c_i$ 为聚类中心点。

K均值聚类法在进行聚类时需要不断更新和划分的类别,直到适应度函数满足条件或算法达到最大迭代次数。

从K均值聚类法的聚类过程可知,K均值聚类法基本准则是最小误差平方和,通过迭代将相似数据对象划分到同一类簇,并计算聚类中心,直到准则函数收敛,则结束迭代,输出计算结果。准则函数的计算公式为:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \left| x - \bar{x}_i \right|^2 \quad (9)$$

式中, $E$ 为准则函数; $x$ 为数据对象。

从式(9)可以看出,准则函数越小,说明类簇中的数据对象相似性越大;准则函数越大,说明类簇中的数据对象相似性越小。

K均值聚类法原理简单、所需调节的参数少,对数据对象的要求不高,容易实现,目前已广泛应用于医疗、交通、能源等领域。但K均值聚类法的聚类效果受聚类中心的数量影响较大,取值不当时容易使算法陷入局部最优,影响聚类结果的准确性。

## 2 家电负荷需求响应潜力分析

电热水器、空调等家电负荷具有一定的局部记忆性和弹性,称为局部记忆性弹性负荷<sup>[14]</sup>,此类家电负荷需求响应的优化模型为:

$$F_{EPM} = \max f_{m_{EPM}} \quad (10)$$

式中, $f_{m_{EPM}}$ 为家电负荷需求响应目标函数。

家电负荷参与需求响应前后用电量的变化可表示为:

$$\begin{cases} u_{\text{cost}} = 1 - \frac{C_{\text{DR}} - C_0}{C_0} \\ C_0 = \sum_{t=1}^{24} (P_0 P^t) \\ C_{\text{DR}} = \sum_{t=1}^{24} (P_t P^t) \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $g_d^s$  为用电量指标;  $C_0$  为负荷需求响应前的电量;  $C_{\text{DR}}$  为负荷需求响应后的电量;  $P_0$  为响应前功率;  $P_t$  为响应后功率;  $P^t$  为  $t$  时段的实时功率。

局部记忆性弹性负荷需要考虑用电舒适度指标, 其表达式为:

$$u_{\text{EPM}} = 1 - \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \frac{|\theta_{\text{in}}^t - (\theta_{\text{inmin}}^t + \theta_{\text{inmax}}^t) / 2|}{(\theta_{\text{inmin}}^t + \theta_{\text{inmax}}^t) / 2} \quad (12)$$

式中,  $u_{\text{EPM}}$  为舒适度指标;  $\theta_{\text{in}}^t$  为  $t$  时段家电设置的温度;  $\theta_{\text{inmin}}^t$  为  $t$  时段设置的最低温度;  $\theta_{\text{inmax}}^t$  为  $t$  时段设置的最高温度;  $(\theta_{\text{inmin}}^t + \theta_{\text{inmax}}^t) / 2$  表示  $t$  时段的预期目标温度。

利用几何加权方式<sup>[15]</sup>得到如下综合优化目标:

$$\max f_{\text{better}} = \sqrt{\omega_{\text{cost}} \mu_{\text{cost}}^2 + \omega_{\text{comfort}} \mu_{\text{comfort}}^2} \quad (13)$$

$$\mu_{\text{comfort}} = \sqrt{\omega_{\text{EPM}} \mu_{\text{EPM}}^2} \quad (14)$$

式中,  $\omega_{\text{cost}}$  为用电成本加权系数;  $\omega_{\text{comfort}}$  为舒适度加权系数;  $\omega_{\text{EPM}}$  为舒适度权重。

则可以得到局部记忆性弹性负荷参与需求响应时的优化目标为:

$$\max f_{\text{in\_EPM}} = \sqrt{\omega_{\text{EPM\_cost}} \mu_{\text{EPM\_cost}}^2 + \omega_{\text{EPM\_comfort}} \mu_{\text{EPM\_comfort}}^2} \quad (15)$$

式中,  $\omega_{\text{EPM\_cost}}$  为局部记忆性弹性负荷的用电量权重;  $\omega_{\text{EPM\_comfort}}$  为局部记忆性弹性负荷的舒适度权重;  $\mu_{\text{EPM\_cost}}$  为局部记忆性弹性负荷的用电量衡量指标;  $\mu_{\text{EPM\_comfort}}$  为局部记忆性弹性负荷的舒适度衡量指标。

### 3 家电负荷需求响应潜力评估

#### 3.1 FWA 算法优化 K 均值聚类步骤

K 均值聚类法在聚类分析时比较依赖初始聚类中心, 导致其容易陷入局部最优, 考虑到 FWA 算法良好的寻优能力, 本文提出一种基于 FWA 优化 K 均值聚类算法。利用 FWA 算法确定 K 均值聚类的初始聚类中心, 在此基础上进行聚类计算。为此需要在烟花算法中设置选择策略, 设置包含初始烟花、高斯火花、爆炸火花的元素集合  $Y_H$  ( $H$  为集合中元素的数量), 集合  $Y_H$  中每个元素被选择的概率为:

$$p_i = \frac{\sum_{j=1}^H h_{ij}}{\sum_{i=1}^H \sum_{j=1}^H h_{ij}} \quad (16)$$

$$h_{ij} = \|f_i - f_j\| \quad (17)$$

式中,  $h_{ij}$  为烟花  $i, j$  的欧氏距离。

基于 FWA 优化 K 均值聚类算法的实施步骤如下:

- (1) FWA 算法参数初始化, 设置烟花种群数量和最大迭代次数;
- (2) 计算烟花个体适应度值和爆炸半径, 并对生成的火花数进行统计;
- (3) 选择部分火花进行高斯变异, 并计算其适应度值;
- (4) 在元素集合  $Y_H$  中选择  $N$  个火花进入下一代;
- (5) 将  $N$  个火花作为初始聚类中心, 通过计算欧氏距离对数据对象进行划分;
- (6) 对各聚类中心进行更新。

#### 3.2 建立评估模型

本文以用户各时段参与需求响应时的最大削减功率为输入量, 负荷需求响应潜力为输出量, 采用烟花算法进行训练, 确定 K 均值聚类的初始聚类中心, 利用 K 均值聚类进行计算, 得出负荷需求响应潜力值。根据上述思路, 基于烟花算法优化 K 均值聚类的家电负荷需求响应潜力评估模型的建模流程如图 1 所示。

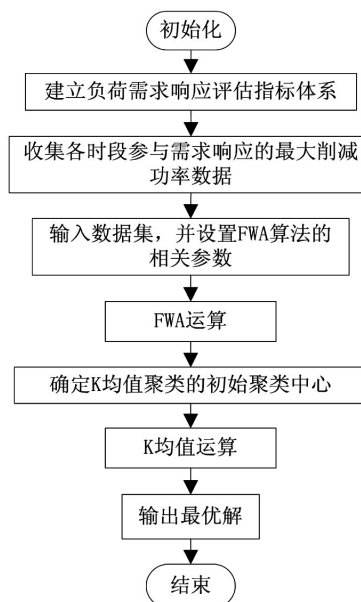


图 1 建模流程图

### 4 实例分析

本文选择的家电为空调, 以空调负荷需求响应潜力为例进行算例分析。为了便于计算, 假设空调用电功率只受设定温度的影响, 则空调负荷调节模型为:

$$\Delta P = f_k \Delta T \quad (18)$$

式中,  $\Delta P$ 为空调变化功率;  $\Delta T$ 为设定温度变化量;  $f_k$ 为修正系数。

表1 1 000 W空调可调负荷与设定温度变化量之间的关系

设定温度 变化量/℃	定频空调		变频空调	
	可调负荷潜力/%	可调负荷/W	可调负荷潜力/%	可调负荷/W
1	11	110	7	70
2	22	220	12	120
3	33	330	17	170
4	44	440	22	220

空调分为定频空调和变频空调,表1给出了1 000 W空调可调负荷与设定温度变化量之间的关系。在实际使用中,空调负荷变化量建筑物高度、房屋面积、墙壁厚度、室外温度、人员流动等多种因素的影响,其实际可调负荷可能存在一定差异。

烟花算法的参数设置如下<sup>[16]</sup>:烟花种群规模为10、变异个体数量为5,最大迭代次数为200、爆炸半径为30。

采用本文所提基于烟花算法优化K均值聚类的家电负荷需求响应潜力评估方法,对某台区夏季高峰时段空调负荷的需求响应潜力进行估算,计算结果如表2所示。午高峰需求响应潜力占空调总负荷和台区总负荷的39.4%和19.6%,晚高峰需求响应潜力占空调总负荷和台区总负荷的46.9%和29.9%,由此可见,高峰时段空调负荷需求响应潜力占台区总负荷的19.6%–29.9%,空调负荷需求响应潜力较大。

表2 某台区夏季高峰时段空调负荷的需求响应潜力估算结果

高峰期	午高峰	晚高峰
时段	11:00–13:00	18:00–22:00
台区负荷峰值/kW	561	694
空调负荷/kW	280	442
可调负荷/kW	110	208
需求响应潜力/空调总负荷/%	39.4	46.9
需求响应潜力/台区总负荷/%	19.6	29.9

## 5 结束语

本文对家电负荷的需求响应潜力进行了理论分析,以用户各时段参与需求响应时的最大削减功率为输入量,负荷需求响应潜力为输出量,采用烟花算法对K均值聚类的初始聚类中心进行优化,建立了基于烟花算法优化K均值聚类的家电负荷需求响应潜力评估模型,采用空调负荷需求响应潜力为例进行算例分析,结果表明,高峰时段空调负荷需求响应潜力占台区总负荷的19.6%–29.9%,需求响应潜力较大。

## 参考文献:

- [1] 徐英,李满君,段振兴,等.基于灰色关联分析的短期电力负荷预测系统[J].电子设计工程,2022,30(20):185–188,193.
- [2] 简定辉,李萍,黄宇航,梁志洋.基于CNN–LSTM网络的短期电力负荷预测[J].电工电气,2022(9):1–6.
- [3] 苏颜,张珍,林庆达,等.基于BP神经网络算法的短期电力负荷预测研究[J].电子设计工程,2022,30(12):167–170,175.
- [4] 伍子东.需求响应关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [5] 程云祥,张海静,梁雅洁,等.计及负荷分类及其需求响应的电力现货市场研究[J].电气技术与经济,2022(1):75–78.
- [6] 艾永乐,丁剑英,刘群峰,等.计及负荷需求响应的并网家用光伏系统协同优化调度[J].太阳能学报,2021,42(9):104–114.
- [7] 欧飞,刘敏,李震.基于电价敏感度和价格弹性的地区需求响应潜力评估[J].电力科学与工程,2022,38(9):1–7.
- [8] 吴迪,王韵楚,郁春雷,等.基于高斯过程回归的工业用户需求响应潜力评估方法[J].电力自动化设备,2022,42(7):94–101.
- [9] 孔祥玉,刘超,王成山,等.基于深度子领域自适应的需求响应潜力评估方法[J].中国电机工程学报,2022,42(16):5786–5797,6156.
- [10] 颜勤,涂晓帆.天气影响下基于风险评估的电动汽车光伏电站需求响应[J/OL].重庆大学学报:1–10[2022–11–22].
- [11] 代贤忠,韩新阳,靳晓凌.需求响应参与电力平衡的成本效益评估方法[J].中国电力,2022,55(10):170–177.
- [12] 孙凤杰,王克俭,何振学,等.基于烟花算法的云计算任务调度研究[J].计算机仿真,2022,39(03):340–343+443.
- [13] 汤深伟,贾瑞玉.基于改进粒子群算法的k均值聚类算法[J].计算机工程与应用,2019,55(18):140–145.
- [14] 孙彦萍,李虹,杨文海,等.基于SOM需求响应潜力的居民用户优化聚合模型[J].电力建设,2017,38(7):25–33.
- [15] 陈朋永,赵书涛,乔辰,等.模糊几何加权法求解电力系统经济调度问题[J].电力科学与工程,2012,28(5):1–5.
- [16] 聂昕磊,樊艳芳.基于改进烟花算法的电动汽车与新能源协同调度[J].太赫兹科学与电子信息学报,2022,20(7):738–745.

作者简介:刘乐(1993–),男,硕士,工程师,研究方向:电力市场、需求侧响应方向。