

# 基于主成分聚类分析法的智慧电力城市评价方法和评价体系研究

## Research on Evaluation Method and Evaluation System of Smart Power City Based on Principal Component Cluster Analysis Method

田圣双 党林森 马奥 王昊

Shengshuang Tian Linsen Dang Ao Ma Hao Wang

国网陕西省电力有限公司超高压公司 中国·陕西 西安 710000

State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Ultra-high Voltage Company, Xi'an, Shaanxi, 710000, China

**摘要:** 针对目前城市智慧电力综合评价指标体系和评价方法不统一, 指标体系重叠交叉较多的问题, 提出了基于主成分聚类分析法的城市节能减排效果评价方法。首先给出了 31 个节能减排效果评价指标的概念及意义; 介绍了主成分分析法, 并介绍了聚类算法; 给出了评价方法和指标体系的建立流程; 然后, 以中国北京、上海、重庆和天津为例进行了计算分析, 算例表明该方法能够减小指标之间的耦合关系和重叠交叉(指标之间的相互影响), 评价效果良好, 具有工程应用价值。

**Abstract:** Aiming at the problems that the index system and evaluation methods of the comprehensive evaluation of smart power city are not uniform and the index system overlaps more, an evaluation method of urban energy conservation and emission reduction effect based on principal component cluster analysis was proposed. Firstly, the concept and significance of 31 evaluation indexes of energy-saving and emission reduction effect are given. The principal component analysis method and clustering algorithm are introduced. The evaluation method and the establishment process of index system are given. Then, taking Beijing, Shanghai, Chongqing and Tianjin as examples, the calculation and analysis show that the proposed method can reduce the coupling relationship and overlap (mutual influence between indicators), and the evaluation effect is good, and it has engineering application value.

**关键词:** 节能减排评价; 主成分分析法; 聚类分析方法

**Keywords:** evaluation of energy conservation and emission reduction; principal component analysis; cluster analysis method

**DOI:** 10.12346/peti.v5i4.8825

## 1 背景和意义

“十四五”规划期间是中国经济转型升级的关键阶段, 同样也是全面建设小康社会的最后冲刺阶段。目前, 针对城市之间的智慧电力效果评价指标体系和评价方法并没有一个统一的标准, 且以往研究的指标和方法侧重点不同, 多采用层次分析法、序关系分析法、模糊综合评价、德尔菲法、基于灰色综合排名的综合评价等, 在指标体系的管理过程中, 受评价人员主观因素影响较大, 且各指标之间存在交叉和耦合作用, 影响评价结果的客观公正性。针对这个问题, 选取了 31 个指标, 基本涵盖智慧电力所有方面, 采用基于主成分聚类分析法, 对参与评价的城市进行评分, 并能够对所有指标进行自动分类, 为建立指标体系提供参考, 使各二级指标耦合关联程度最小, 评价体系更加合理。

## 2 智慧电力评价指标体系建立原则及相关指标

智慧电力效果评价指标体系及方法, 根据评价对象的不同而有所区别, 有的针对不同火电机组装机量或电厂发电量, 有的针对城市或者省份配网发展情况, 而有的侧针对不同行业, 论文针对城市之间的智慧电力效果, 给出了评价指标体系建立原则和广泛应用的指标。

### 2.1 智慧电力评价指标体系建立原则

为保证评价管理体系的合理性, 在参考常规指标设计的普适性原则及智慧电力的特殊性要求基础上, 固定了四方面原则: 综合性原则、代表性原则、可比性原则、可行性原则。

### 2.2 智慧电力效果评价相关指标

按照智慧电力指标体系设计原则的相关要求, 结合电力行业关于智慧电力已有的相关研究, 经过仔细分析, 在普适

【作者简介】田圣双(1992-), 男, 硕士, 工程师, 从事节能减排研究。

性与可行性上, 论文从以下五个方面构建了中国智慧电力指标体系(数据来源为: 国家统计局)。

### 2.2.1 智慧用电覆盖率

智慧用电方面主要针对用户用电体验, 包括智能电表覆盖率、网上国网用户占比、国网电车充电桩占比等指标。

### 2.2.2 智慧发电应用率

智慧发电主要针对风力发电、分布式光伏发电、集中式光伏发电、配套储能电站、新型热电站的装机容量在城市用电中的占比。

### 2.2.3 智慧输电网占比

该指标体系主要针对输电网的图像在线检测装置、覆冰检测装置、导线舞动检测、杆塔倾斜检测装置、分布式故障诊断装置的装配比, 同时考察输电网的自愈能力, 即机器人在输电网检修中的应用率。

### 2.2.4 智能配电网占比

智能配电网指标体系应用教广泛, 主要包括配网自动化覆盖率, 配网用户中心应用率, 配网故障自愈能力等。

### 2.2.5 智能变电站占比

智能变电站是电网重要组成部分, 变电站巡检机器人、巡检无人机应用率、变电站一键顺控覆盖率, 变电站智能监控、智能安防应用率。

## 3 主成分聚类分析法

主成分聚类分析方法, 和 PCA 算法相似, 是通过特征值和特征向量降维, 尽量减小各个维度(论文指得是指标)之间的关联程度, 同时主成分组成的高维空间中, 会出现聚类现象, 通过对各个指标的聚类分析得到最优的聚类效果, 这也是建立新指标系统的理论依据。主成分聚类分析计算过程: 首先根据原评价体系配置指标矩阵。假如原评价体系共有  $n$  个评价指标, 对  $m$  个评价对象进行了指标采样, 那么原始数据评价矩阵可以表示为矩阵  $X$ 。为消除量纲影响、规范化评价指标量测值域, 对原始数据矩阵  $X$  中各列向量进行正态分布标准化处理, 得到标准化矩阵  $Z$ 。

$$Z = (z_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在标准化矩阵的基础上按公式(2)求取表征矩阵内各元素相互关系的相关系数矩阵  $\Sigma$ , 如式(3)所示。

$$\delta_{z_i z_j} = \frac{cov(z_i, z_j)}{\sqrt{Var(z_i)Var(z_j)}} \quad (2)$$

其中:  $cov(z_i, z_j)$  表示向量  $z_i$  与  $z_j$  的协方差;  $Var(z_i)$  为向量  $z_i$  的样本方差。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \delta_{z_1 z_1} & \dots & \delta_{z_1 z_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{z_n z_1} & \dots & \delta_{z_n z_n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据矩阵论相关理论, 可知对称正定矩阵  $\Sigma$  必正交相似于对角阵  $\Lambda$ , 如公式(4)所示。

$$U^T \Sigma U = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

不妨假设  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n$ 。  $U$  是与特征根相对应的特征向量组成的正交阵, 可按式(5)记为:

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (5)$$

另一方面, 可以证明由矩阵  $U$  的第一列元素所构成的原始变量的线性组合有最大的方差。也即存在  $n$  维正交向量  $a = (a_{11}, a_{21}, \dots, a_{n1})$  使得式(6)且仅当  $a_1 = u_1$  时等号成立。

$$Var(F_1) = Var(a_1^T Z) \leq \lambda_1 \quad (6)$$

依此类推, 有:

$$cov(F_i, F_j) = u_i^T \Sigma u_j = 0 \quad (7)$$

$$Var(F_i) = Var(u_i^T Z) = u_i \Sigma u_i = \lambda_i \quad (8)$$

上述(1)表明,  $Z$  的主成分  $F_i$  就是以  $\Sigma$  的特征向量为系数的线性组合, 彼此互不相关, 其方差是  $\Sigma$  的特征根。并且有:

$$Var(F_1) \geq Var(F_2) \geq \dots \geq Var(F_n) \geq 0 \quad (9)$$

最后按照式(10)和式(11)求得第  $i$  主成分的方差贡献率以及累积方差贡献率。

$$\omega_i = \lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (10)$$

$$\rho = \sum_{i=1}^n \lambda_i / \sum_{j=1}^n \lambda_j \quad (11)$$

至此, 所有主成分变量计算完成, 根据保留数据信息量的一般性准则, 当  $\rho \geq 85\%$  时, 保留前  $S$  个主成分, 按公式(12)生成综合主成分评价函数, 并计算最终评价分值, 给出评价结果。

$$f = \omega_1 \lambda_1 + \omega_2 \lambda_2 + \dots + \omega_s \lambda_s \quad (12)$$

最后, 定义  $U$  为主成分因子载荷矩阵,  $U$  中的不同数值分别对应前  $S$  个主成分与原评价指标间的相关性系数, 分布范围在  $[-1, 1]$  之间正负号分别代表正相关与负相关, 绝对值越大表明相关性越强。接着采用基于主成分因子载荷矩阵的聚类方法, 以  $|cov(F_i, F_j)| > 0.5$  为聚类判别准则, 对  $n$  个评价指标变量进行聚类识别并划分评价指标体系结构。

## 4 基于主成分聚类分析法的城市节能减排效果评价方法

结合主成分聚类分析理论及其评价模型, 拟定基于主成分聚类评价方法体系的城市节能减排效果评价设计方案, 最

终建立综合评价流程如图 1 所示。

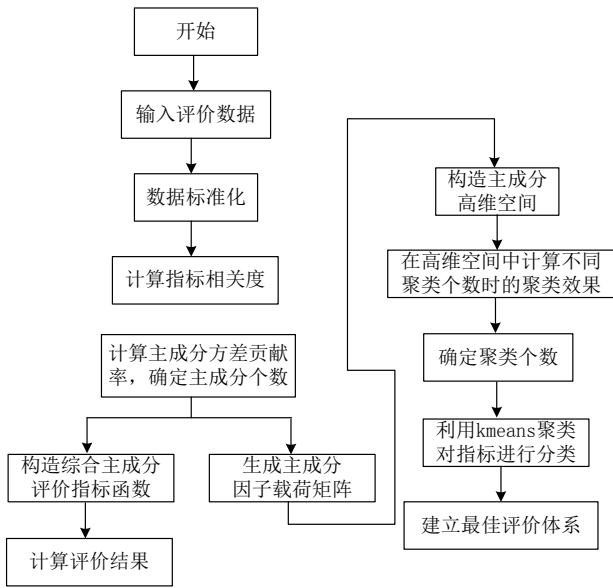


图 1 综合评价流程

### 5 算例说明

以中国北京、上海、重庆和天津为例进行了计算分析，数据采用中国统计年鉴 2021 年数据。

计算结果中，评价价值的主成分特征值分布、被考察城市的主成分评价函数值如表 1、表 2 所示。

表 1 评价价值的主成分特征值分布

主成分	方差大小	方差贡献率	累计方差贡献率
1.000	19.072	0.578	0.578
2.000	8.598	0.261	0.838
3.000	5.330	0.162	1.000
4.000	0.000	0.000	1.000
5.000	0.000	0.000	1.000

表 2 被考察城市的主成分评价函数值

城市	第一主成分评价价值	第二主成分评价价值	第三主成分评价价值	综合评分
北京	-0.21756	-1.38882	0.848871	-0.351
上海	-0.42179	0.380619	-0.00662	-0.146
重庆	0.338591	1.290009	-0.24514	0.492
天津	0.300765	-0.28181	-0.59711	0.004

可以看到评分中，重庆市分数最高，其次为天津市、上海市，最后为北京市。以第一、第二主成份因子载荷构成二维空间，进行聚类，结果如图 2 所示。

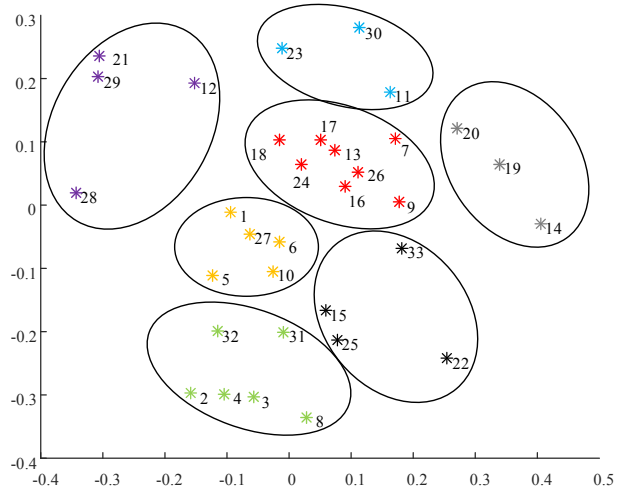


图 2 以第一、第二主成份因子载荷构成二维空间的聚类情况

通过以上计算和分析，可知通过聚类得到最佳指标体系，和最初选择评价指标时的体系，基本一致，因此通过聚类方法得到的最佳指标体系是客观合理的。

### 6 总结

论文首先给出了智慧电力城市评价指标的概念及意义。介绍了主成分分析法、聚类算法，然后给出了评价方法和指标体系的建立流程；最后，以北京、上海、重庆和天津为例进行了计算分析，算例表明论文方法评价效果良好，具有工程应用价值。这有利于智慧电力城市中的绿色环保理念的形成，并能实现城市之间的评分和排名化，提高城市间的“智慧电力”和“绿色”竞争压力。

主要创新点：①将主成分分析方法应用于城市节能减排效果评价。②利用聚类分析方法，优化了指标体系，使各个体系之间的交叉重叠最少。

### 参考文献

- [1] 贾康.“十三五”时期的供给侧改革[J].国家行政学院学报,2015(6):12-21.
- [2] 李明.高校节能减排评价指标体系及综合评判方法[J].西安工业大学学报,2011(4):404-408.
- [3] 李爱军.基于层次分析法的湖北省节能减排综合评价研究[A].中国系统工程学会.和谐发展与系统工程——中国系统工程学会第十五届年会论文集[C].中国系统工程学会,2008.
- [4] 徐雯.基于灰色关联分析的农宅节能潜力评价——以夏热冬冷地区为例[J].建筑节能,2016(6):39-42.
- [5] 胡文婷.城市轨道交通系统效率指标体系与多方式路网优化设计[D].南京:东南大学,2015.