

「节能减排」

区域电网节能减排评价模型与方法

文/国网四川省电力公司眉山供电公司 周浩然

我国以燃煤发电为主，导致电力行业成为能源消耗与环境污染大户，电力行业节能减排的开展势在必行。选取包括煤电替代、网损以及污染物排放在内的区域电网节能减排指标，利用基于层次分析法的投影寻踪方法建立了多元节能减排评价模型，采用改进的加速遗传算法对该模型进行求解，实现了区域电网节能减排综合评价。计算结果表明，该方法能够科学地、有效地反映区域电网节能减排水平。

随着社会的发展，能源消耗不断增加，资源环境问题日益突出。在此背景下，节能减排已成为世界各国实现可持续发展的重要战略任务。电力作为我国发展的重要能源，同时也是污染物排放大户。长期以来我国电力结构都以火电为主，电能生产过程中排放大量的二氧化硫、氮氧化物、二氧化碳以及粉尘等，造成酸雨、臭氧层破坏、温室效应等环境危害。2006年我国电力行业SO₂排放量达到1 770万t，约占全国SO₂排放总量的63%。近两年出现的大气污染指标PM_{2.5}、PM₁₀与硫和氮的氧化物以及粉尘密切相关。由此可见，推进电力节能减排意义重大。

国内外对电力行业节能减排进行了不同角度的分析与研究。本文选取了包括煤电替代、网损以及污染物排放在内的7个节能减排指标，对区域电网整体节能减排情况进行综合评价。

评价方法选取的合理与否直接影响着最终评价结果的好坏。由于传统的数据分析方法是建立在总体服从正态分布的基础上的，而评价模型中的数据多不满足正态假定并且均为高维数据。因此，过于形式化、数学化的传统数据分析方法可能无法找到数据的内在规律和特征，远不能满足高维非正态分布数据分析的需要，需要用稳健的、实用的方法来解决。

投影寻踪聚类（Projection Pursuit Cluster, PPC）方法能够很好地解决上述问题。基本思想：把高维度的数据通过一定的组合投影到低维度子空间上，并采用投影指标函数来描述投影值，进而暴露原系统综合评价问题某种分类排序的可能性大小，寻找出使投影指标函数达到最优的投影值，然后根据该投影值来分析高维数据的分类结构特征。同时，为避免评价结果与决策者的认识和经验不一致，本文利用基于层次分析法的投影寻踪方法建立了多元数据评价模型。

基于此，为了促进区域电网整体节能减排效果的最优，本文选取了包括煤电替代、网损以及污染物排放在内的7个节能减排指标，构成区域电网节能减排评价指标集；利用基于层次分析法的投影寻踪方法建立了多元节能减排评价模型，采用改进的加速遗传算法（Real-coded Accelerating Genetic Algorithm, RAGA）对该模型进行求解，有效避免过于形式化、数学化的传统数据分析方法无法准确全面地找到数据的内在规律和特征，远不能满足高维非正态分布数据分析的需要的缺陷。

区域电网节能减排指标的选取

区域电网节能减排包含的因素众多，评价指标应该具有有效性、通用性、代表性，这样才能

确保区域电网节能减排评价模型的合理性。为了促进区域电网节能、降耗、减污、增效的顺利进行,本文选取包括煤电替代、网损以及污染物排放在内的7个节能减排指标,构成区域电网节能减排评价指标集。

1) 火电的单位煤耗。包括供电煤耗和供热煤耗。供电煤耗是指火电厂每向电网提供1 kW·h的电能所消耗的标准煤量,单位为g/(kW·h)。供热煤耗是指热电厂(机组)每提供1 GJ的热量所消耗的标准煤量,单位为g/GJ。供电煤耗和供热煤耗是反映火电厂能源转化效率的重要指标,是火电厂生产经营情况的综合体现。因此,有必要将其作为区域电网节能减排的评价指标。

根据3.6 MJ的热量相当于1 kW·h的电量,将供热煤耗折算成等效供电煤耗,并将其与单位供电煤耗统称为火电的单位煤耗。

2) 清洁能源机组占总装机容量的比例。清洁能源机组包括水电机组、风电机组、太阳能发电机组、燃气机组等。目前,煤电转化使得燃煤电厂成为我国主要的污染物来源,不仅需要通过增效来实现节能减排,还需要实施煤电替代战略,促进绿色电力发展。因此,清洁能源机组所占比例直接影响区域电网节能减排的好坏,有必要将其作为区域电网节能减排的评价指标。

3) 新能源机组的平均利用小时数。新能源机组中的光伏发电和风电的弃电现象严重,弃电不仅是一种资源的浪费,也体现着新能源发电的参与度。因此,选取新能源机组的平均利用小时数衡量新能源发电的贡献情况,并且该指标的大小直接影响节能减排的效果。

4) 最大负荷调峰深度。调峰深度影响着机组的经济运行效率,而随着新能源发电并网比例不断增加,调峰变得更为重要,故将其作为区域电网节能减排的指标之一。

5) 网损。电力网络的发电、输电、配电环节均会产生电能的损耗,其中尤以配电网的电能损耗最大。据统计,我国10 kV配电网络长度占电力网总长度的60%左右,而损耗比例是总线损的80%左右。因此,降低损耗也是区域电网节能减排的一项重要指标。

6) 单位SO₂排放。SO₂作为酸雨的主要成分,并且与近年来人们关心的PM2.5、PM10密切相关。并且SO₂污染治理成本高,有必要将其作为区域电网节能减排的评价指标。单位为

mg/m³。

7) 单位NO_x排放。NO_x是造成光化学烟雾的主要因素,而且它产生的温室效应大约是CO₂的200~300倍。有必要将其作为区域电网节能减排的评价指标。单位为mg/m³。

区域电网节能减排评价模型与方法

1. 评价方法

本文建立的区域电网节能减排指标集数据维数过高,不能直观体现出区域电网节能减排效果,利用投影寻踪方法建立了多元数据评价模型,采用实数编码的遗传算法对该模型进行求解,以对区域电网整体节能减排情况进行综合评价。

2. 基于遗传算法的投影寻踪聚类模型

基于RAGA的投影寻踪聚类评价模型(Projection Pursuit Classification model based on RAGA, RAGA-PPC模型)的建模过程包括以下四个步骤。

步骤1: 样本指标集的归一化处理。设各指标值的样本集为 $\{x^*(i, j) | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p\}$, 其中 $x^*(i, j)$ 为第*i*个样本的第*j*个指标值, *n*、*p*分别为样本的个数(样本容量)和指标的数目。为了消除各指标值的量纲和统一各指标值的变化范围,可采用下式进行极值归一化处理:

对于越大越好的正向指标

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (6)$$

对于越小越优的逆向指标

$$x(i, j) = \frac{x_{\max}(j) - x^*(i, j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (7)$$

式中, $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第*j*个指标值的最大值和最小值; $x(i, j)$ 为指标特征值归一化的序列。

步骤2: 利用层次分析法确定各评价指标权重系数。层次分析法就是专家通过根据重要性大小对*n*个评价因素进行两两比较,排成一个*n*阶判断矩阵。是一种简便实用的评价方法。层次分析法赋权步骤: ①构造判断矩阵*P*。②求判断矩阵最大特征值及特征矢量。③对判断矩阵进行一致性检验。④计算指标权重系数矢量*R*。当判断矩阵一致性不满足要求时,调整直至满意为止。

步骤3: 构造投影指标函数*Q(a)*。投影寻踪分类方法就是把*p*维指标赋权标准化样本数据 $\{(\omega, x_{ij}) | i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, p\}$ 综合成以 $a = \{a(1), a(1), a(1), \dots, a(p)\}$ 为投影方向的

一维投影值 $z(i)$ 。

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)\omega(j)x(i, j) \quad (8)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, n$; a 为单位长度矢量。综合投影指标值时, 要求投影值 $z(i)$ 的散布特征应为: 局部投影点尽可能密集, 最好凝聚成若干个点团, 而在整体上投影点团之间尽可能散开。因此, 投影指标函数可以表达成

$$Q(a) = S_z D_z \quad (9)$$

式中, S_z 为投影值 $z(i)$ 的标准差, D_z 为投影值 $z(i)$ 的局部密度, 即

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E(z)]^2}{n-1}} \quad (10)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [R - r(i, j)] \cdot u[R - r(i, j)] \quad (11)$$

式中, $E(z)$ 为序列 $\{z(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值; R 为局部密度的窗口半径; $r(i, j)$ 表示样本之间的距离, $r(i, j) = |z(i) - z(j)|$; $u(t)$ 为一单位阶跃函数, 当 $t \geq 0$, 其值为1, 当 $t < 0$ 时其函数值为0。

步骤4: 优化投影指标函数。不同的投影方向反映不同的数据结构特征, 最佳投影方向就是最大可能暴露高维数据某类特征结构的投影方向, 因此可以通过求解投影指标函数最大化问题得到最佳投影方向, 即

最大化目标函数: $\text{Max}: Q(a) = S_z D_z$

约束条件: $\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1$

这是一个以 $\{a(j) | j = 1, 2, \dots, p\}$ 为优化变量的复杂非线性优化问题, 用传统的优化方法处理较难。本文采用基于实数编码的加速遗传算法来解决其高维全局寻优问题。

步骤5: 分类。把步骤3求得的最佳投影方向 a^* 代入 $z(i) = (j)\omega(j)x(i, j)$ 后可得到各样本点的投影值 $z^*(i)$ 。将 $z^*(i)$ 与 $z^*(j)$ 进行比较, 按 $z^*(i)$ 值从大到小排序, 则可以将样本从优到劣进行排序。

3. 基于实数编码的加速遗传算法

基于实数编码的加速遗传算法是在标准遗传算法 (Standard Genetic Algorithm, SGA) 的基础上进行改进的, 标准遗传算法本文不再详细介绍。由于SGA不能保证全局收敛性, 为此, 可采用第一次、第二次进化迭代产生的优秀个体的变量变化区间作为下次迭代时优化变量新的初始变化区间, 算法进入第一步, 重新运行SGA, 如此加速运行, 则优秀个体区间将逐渐缩小, 与最优

点的距离越来越近。直到最优个体的优化准则函数值小于某一设定值或算法运行达到预定加速次数, 算法结束, 得到最优结果。这种思想构成了基于实数编码的加速遗传算法。

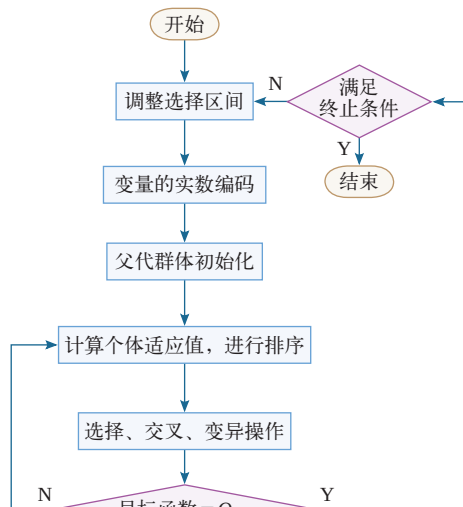


图1 加速遗传算法实现的流程图

4. 区域电网节能减排评价模型

本文所选指标涉及煤电替代、污染物排放监督以及网损, 共7个指标, 对区域电网进行节能减排评价。利用基于层次分析法的投影寻踪聚类模型将多维数据转化为一维投影特征值, 综合反映区域电网整体节能减排的效果。某四个省域电网的基本数据如表3所示, 其中, 新能源发电仅考虑风电, 清洁能源发电仅考虑水电和风电。

表3 区域电网能耗数据

评价 单位	供电煤耗 /[g(kW·h)]	供热煤耗 /(kg/GJ)	等效供电煤耗 /[g(kW·h)]
1	320	38.24	457.66
2	306	32.45	422.82
3	318	39.62	458.40
4	311	34.58	435.49

对表4中的节能减排评价指标通过层次分析法得到一致性判断矩阵为

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 4 & 7 & 5 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1 & 3 & 5 & 4 & 1/3 & 1/2 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 4 & 2 & 1/4 & 1/3 \\ 1/7 & 1/4 & 1/3 & 1 & 1/2 & 1/7 & 1/5 \\ 1/5 & 1/3 & 1/2 & 2 & 1 & 1/5 & 1/4 \\ 1 & 3 & 4 & 7 & 5 & 1 & 2 \\ 1/2 & 2 & 3 & 5 & 4 & 1/2 & 1 \end{pmatrix}$$

表4 节能减排评价指标模型

评价单位	等效煤耗	清洁能源装机比例 (%)	新能源利用小时数/h	最大负荷调峰深度	网损率 (%)	单位SO ₂ 排放	单位NO _x 排放	投影特征值	排序
1	457.66	18.89	1 760	0.84	6.6	295	280	0.003	4
2	442.48	22.65	1 985	0.78	6.4	74	220	0.290	2
3	420.82	36.29	1 845	0.82	5.8	62	96	0.440	1
4	435.49	27.92	1 820	0.88	7.1	284	267	0.116	3

其一致性指标系数为0.047, 具有满意的一致性, 上述指标 $x_1 \sim x_7$ 的权重值 $\omega_1 \sim \omega_7$ 分别为0.277, 0.126, 0.074, 0.031, 0.047, 0.277, 0.172。指标 x_1 在较大程度上反映了区域电网节能的总体强度, 指标 x_6 、 x_7 反映了区域电网减排的总体强度, 上述权重值反映了节能减排指标的特征。

采用基于实数编码的加速遗传算法求解上述投影寻踪模型, 选取初始种群规模为 $n=400$, 交叉概率 $P_c=0.8$, 变异概率 $P_m=0.80$, 优秀个体数目选定为20个, $a=0.05$, 加速次数为11, 得出最大投影指标值为0.015 0, 最佳投影方向为 $a^*=(0.483\ 9, 0.234\ 7, 0.080\ 9, 0.050\ 2, 0.151\ 3, 0.754\ 2, 0.337\ 1)$ 。据此可以说明指标 x_1 、 x_6 的赋权标准化样本值的变化信息对区域电网节能减排起主要影响, x_4 、 x_5 的样本数据变化的变化信息区域电网的节能减排影响较小。把上述权重值 $\omega_1 \sim \omega_7$ 和最佳投影方向 a^* 代入式后得到各区域电网的投影值在 $z_i^*=(0.003\ 4, 0.289\ 8, 0.439\ 9, 0.111\ 5)$, 4个区域电网的投影特征值分布图如图2。

从图2中可以直观得出, 区域电网节能减排效果的优劣排序为 $4>2>1>3$ 。由于区域电网1的煤耗和污染物排放等指标均较高, 节能减排效果最差; 尽管区域电网2的煤耗要高于区域电网4, 但2的污染物排放、网损等指标均较低, 综合评价, 区域电网2的节能减排效果优于4; 区域电网3的煤耗、SO₂和NO_x的排放浓度指标均较低, 并且清洁能源装机比例大、新能源发电利用小时数高, 区域电网3的节能减排效果最好。上述评价结果符合实际。

根据最佳投影方向, 可以进一步分析各个评价指标对评价结果的影响程度。将 a^* 值进行排序得

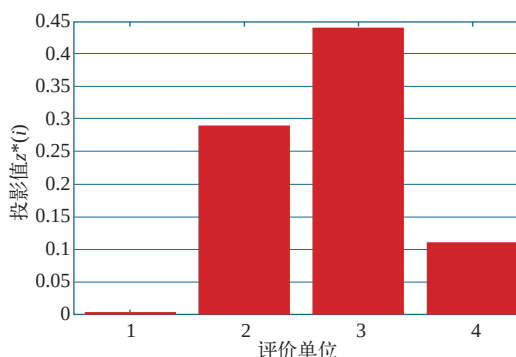


图2 省域电网投影特征值分布图

到各个指标的贡献率大小顺序依次为单位SO₂排放>等效煤耗>单位NO_x排放>清洁能源装机比例>网损率>新能源利用小时数>最大负荷与装机容量比。贡献率越大的指标, 对节能减排评价的影响就越大, 这为节能减排提供重要的决策信息。

结束语

对区域电网进行节能减排评价, 有利于推进电力行业节能减排技术改造, 实现区域电网节能减排的整体最优。本文选取了包括煤电替代、网损以及污染物排放在内的7个节能减排指标, 构成区域电网节能减排评价指标集; 利用基于层次分析法的投影寻踪方法建立了多元区域电网节能减排评价模型, 采用实数编码的加速遗传算法对模型进行求解。最后将该模型应用于某4省域电网, 结果表明该模型能够反映区域电网整体节能减排情况, 实现了区域电网节能减排科学的、有效的综合评价。EA

(收稿日期: 2015.01.07)

[编辑: 白文亭]