

## 基于 DEA 的电网绩效评估方法

闫志雄<sup>1</sup>, 张宁<sup>2</sup>, 宋红芳<sup>2</sup>, 马蕾<sup>2</sup>, 方大川<sup>1</sup>, 杨莉<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 在分析电力企业绩效研究现状, 并综合考虑电网运营特点、绩效分析要求、实际数据等问题的基础上, 提出了一种基于 DEA 的电网绩效分析方法。该方法以 R 聚类技术进行指标精选, 以 Q 聚类技术对不同电网进行分类, 并对所选取指标和分类的有效性进行统计检验。对同类电网采用 DEA 绩效分析, 并利用松弛变量对非 DEA 有效的电网进行投影分析, 从而得到提升电网绩效的最佳路径, 是一种精细化的绩效分析方法。以中电联提供的“十一五”及 2011 年统计数据进行了省级电网绩效实证分析, 验证了所提出方法的有效性和实用性。

**关键词:** R 型聚类; Q 型聚类; DEA; 电网; 绩效评估

### A grid performance assessment method based on DEA

YAN Zhi-xiong<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>2</sup>, SONG Hong-fang<sup>2</sup>, MA Lei<sup>2</sup>, FANG Da-chuan<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** This paper studies the performance assessment and regulation for power enterprise, and proposes a grid performance assessment method based on Data Envelopment Analysis (DEA) considering the power grid operation characteristics, the performance assessment requirements, and the data availability. In the method, R-clustering technology is used for input and output selection. Based on the input and output index, Q-clustering technology is used to classify the power grids. And then the validity of the classification is tested by statistical criterions. Furthermore, the power grids belonging to the same cluster are treated by DEA. The grids which can not be analyzed effectively by DEA are projected by introducing the slack variables to illustrate the optimal route for the performance improvement, which is a delicacy DEA performance method. In the end, real data of the 11<sup>th</sup>-Five-Year Plan period and 2011 provided by China Electricity Council are used to conduct an empirical analysis of provincial-level power grid performance and it illustrates the effectiveness and practicability of the proposed method.

This work is supported by National High-tech Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050204).

**Key words:** R-clustering; Q-clustering; DEA; grid; performance assessment

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)07-0067-06

## 0 引言

绩效分析是电网精益化运营的关键环节。通过绩效分析, 可以评估电网的规划、投资、改造、运行等业务环节, 发现电网发展的薄弱环节以及控制成本、有效利用资金、提升电网性能的最佳途径<sup>[1-2]</sup>。

常用的绩效分析方法可分为单变量评价法和多

指标多角度的综合评价法。单变量评价法有杜邦财务分析法、沃尔比重法、Farrell 测度法等, 综合评价法有平衡计分卡 (Balanced Score Card, BSC)、关键绩效指标 (Key Performance Indicator, KPI)、修正最小二乘法 (Corrected Ordinary Least Square, COLS)、随机前沿分析 (Stochastic Frontier Analysis, SFA)、数据包络分析 (Data Envelope Analysis, DEA) 等。目前电力行业绩效评价多采用综合评价法<sup>[3]</sup>。

上述综合评价方法目前在电力企业绩效分析中都有一定应用。BSC 侧重从财务、客户、内部运营、学习与成长四个角度评价企业长期战略目标; KPI

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划 863 计划 (2012AA050204); 国网科技项目 (“十一五”期间及 2011 年重点省市电网统计调查)

通过选取能够衡量企业战略实施效果的关键指标进行评价。BSC 和 KPI 较适合战略目标及结构稳定、以及投入、产出水平近似的企业。如美国 National Grid 公司和英国 NGET、SPTL、SHETL 三大电网的年度绩效报告中运用了 BSC 进行战略分析,对系统可用率、可靠性等关键指标 (KPI) 进行绩效评估<sup>[4-5]</sup>;加拿大 BCTC 输电公司采用成本指标、可靠性指标等作为关键指标,运用 BSC 进行同业间绩效比较,在评估绩效的同时挖掘可提升空间<sup>[6]</sup>;澳大利亚 TransGrid 绩效评价由类似 BSC 法的多项指标加权得到<sup>[7-8]</sup>。BSC、KPI 便于对企业进行全面的评估,但在绩效衡量指标的确定、非财务指标的量化与解释等方面存在困难,而且评价周期较长。COLS、SFA、DEA 都是基于效率前沿(或有效生产前沿)的分析方法。所谓效率前沿指形成投入一定时最大产出的曲线,或产出一定时最小投入的曲线,通过实际表现与效率前沿间距离来评价研究对象的相对效率,并能经过投影分析找出非效率的原因及改进方向和程度。其中 COLS 和 SFA 是基于生产函数的参数方法,能够区分误差项、对实际效率水平进行准确反映,但存在生产或成本函数选择、指标权重分配、评价指标量化等困难,而且对样本数量要求高。DEA 是一种基于效率前沿的非参数规划方法,评价过程中无需相关先验权重信息和预先估计参数,且对各指标不需要统一单位,因此在避免主观因素、简化运算和减少误差等方面具有优越性。因此本文采用 DEA 方法对电网进行绩效评估。

DEA 技术近年来在电力产业绩效分析方面取得了一定成果。文献[9]采用  $C^2R$  模型对新增资本、运行维护费用、配电设备规模、用电负荷、销售电量等输入输出指标线性规划优化计算,综合评估了美国 50 个配电公司绩效水平,并分析了各电网的效率差距,为指导电网规划提供了依据。文献[10]利用 DEA 方法测评了 1994~2003 年美国电力行业并购风潮时期电力企业的相对效率,结果显示企业并购并不一定改善绩效。文献[11]采用  $C^2R$  模型(一种 DEA 方法),从配电系统设备、运行维护费用、可靠性指标、系统损耗、用电客户等角度,对墨西哥 116 个配电区域绩效水平进行了实例分析。文献[12]将发电厂用电率、供电煤耗、线损率等纳入 DEA 规划计算模型,分析显示 20 年来我国电力行业相对技术效率、规模效益变化不大。

DEA 技术数学模型简单,不要求输入量统一单位,易于应用,但是分析效果与指标选取的有效性和样本的质量密切相关<sup>[13]</sup>。指标过多过细,会指标

冗余,增加收集数据难度,更严重的是会出现类似于变量数超过方程数的情况,产生大量有效单元;反之指标过少,则无法全面评估对象绩效,输入输出之间映射信息不完整。另外,电网发展规模、结构越接近,可比度越高,DEA 分析结果就越有意义。我国电网目前处于高速发展阶段,由于各地域的气候、产业结构、经济发展阶段、发电资源分布、负荷特性等差异较大,电网差异大、可比性差,难以按同一有效生产前沿进行所有电网的绩效分析比较,而个体数目少、特征差异大的样本集也难以进行精细对比<sup>[14]</sup>。以浙江、内蒙古电网为例(2011 年数据),浙江省地处东南沿海,工业、商业经济发达,三产比重为 4.9:51.2:43.9,电力消费需求旺盛、负荷密度大,发电装机为 6 063 万 kW,而全社会用电量达 3 117 亿 kWh,为典型的受电省份;内蒙古位于北部,地域辽阔,各类能源资源丰富,发电装机容量为 7 506 万 kW,三产比重为 9.1:56:34.9,用电量仅为 1 864 亿 kWh,为典型的送电省份。两省产业结构有明显不同,内蒙装机容量比浙江大,电力消费还不到浙江的 60%。显然评估两省电网绩效不宜采用同一标准。

本文在第二部分介绍了 DEA 原理和基本数学模型;第三部分提出结合聚类技术应用 DEA 进行绩效评估的方法,包括以 R 型聚类得到筛选指标、以 Q 型聚类对样本分类、对指标集和分类效果进行统计检验等;最后采用中电联提供的“十一五”和 2011 年我国各省市电网统计数据对模型进行了实证分析,验证所提出方法的有效性和实用性。

## 1 DEA 方法原理

### 1.1 DEA 原理

DEA 是一种适用于多投入产出,并且投入产出难以以同一单位量化分析的对象进行综合评价的线性规划模型,通过比较决策单元 (Decision Making Unit, DMU) 间的相对效率,由 DMU 是否在生产可能集的前沿面上分析相对效率值<sup>[15]</sup>。

以一个简单例子说明 DEA 的基本思想,图 1 为示意图。假设有 6 个电网企业 A~F,投入为电网运营维护费用  $X_1$  和设备投入费用  $X_2$ 。通过 DEA 线性规划模型,可以发现 A~D 4 个电网形成效率前沿面,为 DEA 有效,而电网 E、F 不在效率前沿面上,为非 DEA 有效。电网 E、F 在生产前沿面上的投影分别为 E'、F',线段 EE'、FF'即电网 E、F 绩效需要改善的幅度。显然,输入、输出量的增加,要求同质对象数量的增加,否则形成前沿面会很粗糙。

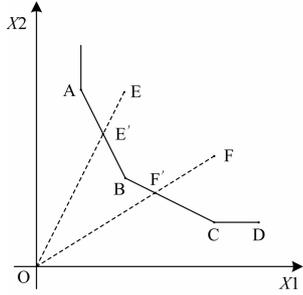


图 1 两投入 DEA 绩效分析案例示意图  
Fig. 1 Diagram for a DEA case with two inputs

### 1.2 DEA 数学模型

本文采用 DEA 技术中经典的 C<sup>2</sup>R 模型和 C<sup>2</sup>GS<sup>2</sup> 模型<sup>[15]</sup>。假设有  $n$  个具有可比性的决策单元(DMU), 记 DMU <sub>$j$</sub>  输入、输出分别为  $X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{sj})^T$ 、 $Y_j = (y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{mj})^T$ ,  $v$ 、 $u$  为权系数, 则 DMU <sub>$j$</sub>  的效率评价指数定义为

$$h_j = \frac{u^T Y_j}{v^T X_j} \quad (1)$$

$h_j$  的含义是投入为  $v^T X_j$ 、产出为  $u^T Y_j$  时的产出与投入之比。总可以适当选取权系数  $v$  和  $u$ , 使得  $h_j \leq 1$ 。

假设以  $j_0$  ( $1 \leq j_0 \leq n$ ) 为分析对象, 为了清晰简便, 复制 DMU <sub>$j_0$</sub>  为 DMU<sub>0</sub> 加入原样本集, DMU<sub>0</sub> 的 C<sup>2</sup>R 效率评价模型即为

$$\begin{aligned} & \max \frac{u^T Y_0}{v^T X_0} \\ \text{s.t.} & \frac{u^T Y_j}{v^T X_j} \leq 1, j = 1, 2, \dots, n \\ & u \geq 0, v \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)含义是通过求解权系数  $v$ 、 $u$ , 即将各个 DMU 重新组合, 最大  $j_0$  效率评价指数。这样的优化问题有  $n$  个, 对应  $n$  个 DMU。

分式规划求解比较困难, 将式

$$t = \frac{1}{v^T X_0} > 0, \omega = tv, \mu = tu \quad (3)$$

代入式(2)进行 Charnes-Cooper 变换, 并运用线性规划的对偶原理, 引入松弛变量, 可得到 C<sup>2</sup>R 的对偶线性规划模型为

$$\begin{aligned} & \min \theta \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + s^- = \theta X_0 \\ & \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - s^+ = Y_0 \\ & \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)的意义为: 给定输出  $Y_0$ , 检查是否可以通过  $n$  个 DMU 加权组合, 以更低的投入得到  $Y_0$ 。 $\theta$  即为 DMU<sub>0</sub> 的相对效率值。松弛变量  $s^-$ 、 $s^+$  为投入的冗余量和产出的不足量, 反映了提高 DMU<sub>0</sub> 绩效的途径;  $\lambda_j$  为 DMU <sub>$j$</sub>  的加权值。

当  $\theta=1$  且  $s^-=s^+=0$  时, 意味着 DMU<sub>0</sub> 是 DEA 有效率的; 当  $\theta=1$  且  $s^- \neq 0$  或  $s^+ \neq 0$  时, DMU<sub>0</sub> 是弱 DEA 有效的; 当  $\theta < 1$  时, DMU<sub>0</sub> 是非 DEA 有效的。

当 DMU 为非 DEA 有效时, 投入产出以式(5)调整, 这里  $(X^*, Y^*)$  称为 DMU<sub>0</sub> 在生产可能集的效率前沿面上的“投影”。

$$X_0^* = \theta X_0 - s^-, \quad Y_0^* = Y_0 + s^+ \quad (5)$$

在 C<sup>2</sup>R 模型结果中, 若存在  $\sum \lambda_j = 1$  成立, 则 DMU <sub>$j$</sub>  为规模效益不变。即可在 C<sup>2</sup>R 模型基础上对生产可能集附加一个限制条件  $\sum \lambda_j = 1$ , 便得到 DEA 分析 C<sup>2</sup>GS<sup>2</sup> 模型为

$$\begin{aligned} & \min \theta_p \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^n X_j \lambda_j + s^- = \theta_p X_0 \\ & \sum_{j=1}^n Y_j \lambda_j - s^+ = Y_0 \\ & \sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \\ & \lambda_j \geq 0, j = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (6)$$

一般  $\theta_p$  称为纯技术效率, 式(4) C<sup>2</sup>R 模型得到的  $\theta$  称为相对综合效率, 而定义规模效率  $\theta_s$  为

$$\theta_s = \theta / \theta_p \quad (7)$$

## 2 结合聚类技术的电网绩效 DEA 模型

电力系统存在影响因素多、运行工况多、物理特征差异大、各部分相互关联紧密等特性, 研究对象可比性要求较高。

聚类分析对先验知识要求低, 是通过将样本集按特征相似程度, 以最大化类内相似性、最小化类间相似性为目标进行分组的多元统计分析技术, 目前在电力系统参数识别<sup>[16]</sup>、负荷预测<sup>[17]</sup>、电网重构<sup>[18]</sup>、状态估计<sup>[19]</sup>等方面已有很多应用。

电网绩效准则层有多个方面, 而且准则层各方面又有大量体现指标。对量不大的样本集, 大量无关的属性使得样本在高维空间中形成簇的可能性几乎为零; 而且数据分布较稀疏, 数据间距离几乎相等, 难以采用传统聚类方法(如均值聚类、模糊聚类)对电网样本分类。

层次聚类算法是根据某种标准将样本集层层分解形成类，本文采用了互补的 R 聚类和 Q 聚类。R 聚类是以 Pearson 相关系数衡量定距变量间的线性关系，对样本集特性进行分类；而 Q 聚类则是用距离（本文选用平方 Euclidean 距离）来测度样本集合个体间的相似程度，对个体进行分类。本文采用 R 型、Q 型层次聚类对 DEA 模型数据预处理，进行电网绩效指标选择和个体分类，减少输入量和提高 DEA 分析决策单元的同质性。

电网绩效 DEA 分析流程见图 2，主要环节为：

- 1) R 聚类选择输入输出指标。
- 2) Q 聚类对电网集进行分类。
- 3) 以单因素分析进行指标有效性验证，有效，到 4)；否，到 1)。
- 4) 对同类中电网个体依次以  $C^2R$  和  $C^2GS^2$  模型计算。
- 5) 对输入输出指标进行敏感性分析，进一步优化指标集。
- 6) 对松弛变量进行投影分析，得到提升电网绩效的最佳路径。

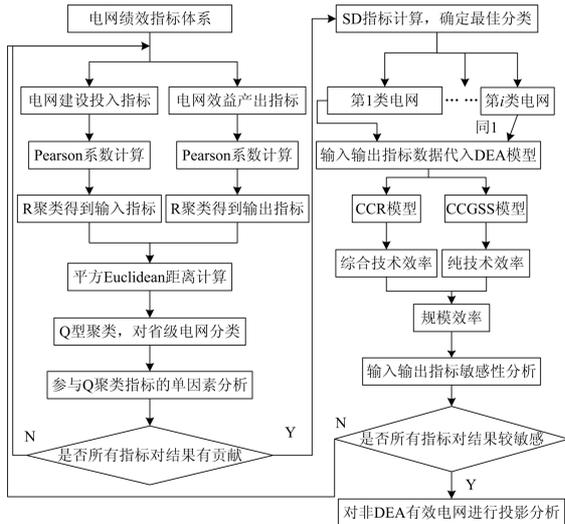


图 2 电网绩效分析算法流程

Fig. 2 Analysis process of grid performance

### 3 对省级电网绩效进行实证分析

#### 3.1 省级电网 DEA 绩效分析指标选取

本文采用中电联《中国电力工业数据统计汇编》2005~2011 年各省市电网数据。包括：

- 1) 费用指标，如建设投资、运行维护费用、新增资本等；
- 2) 基础指标，如输电线路长度、变电设备容量等；
- 3) 技术性指标，如线损率、供电可靠率、平均

停电时间等；

4) 输电能力指标，如供电量、峰值电量、人均用电量等。

R 聚类指标分类结果见图 3。由图可见，供电量与用电量、售电量、线损电量等指标相关性较高，供电量可以有效替代其他指标。对大量指标可以进行类似处理。

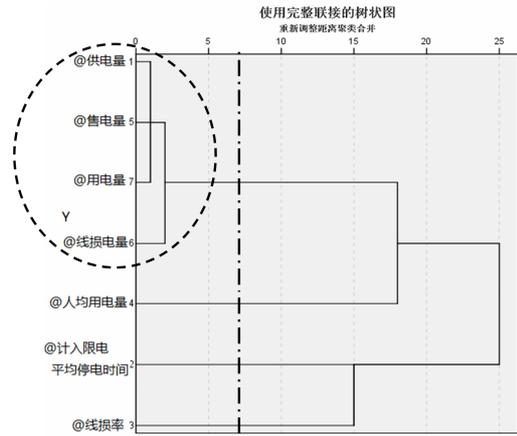


图 3 R 型聚类指标输出结果树状图

Fig. 3 Dendrogram of R-clustering based outputs

依据输入指标之间、输出指标之间的冗余度尽量小，输入与输出之间相关性尽量大的原则，并且通过单因素分析和灵敏度的双重检验，并且考虑到数据可得性，模型输入输出确定为

输入指标

X1: 35 kV 及以上变电设备容量 (万 kVA)

X2: 35 kV 及以上输电线路长度 (km)

X3: 电网项目建设完成投资 (万元)

输出指标

Y1: 供电量 (亿 kWh)

Y2: 人均用电量 (kWh)

Y3: 线损率 (%)

Y4: 计入限电平均停电时间 (h/户)

#### 3.2 省级电网分类

在 3.1 节选取指标基础上，采用 Q 型聚类对省级电网分类 (见图 4)。结果显示我国省级电网分为 6 类时，各类中省市特点、电网特点明显。囿于篇幅，本文仅对前两类省级电网做绩效分析。第 1 类含河北、江苏、浙江、山东、河南、广东 6 省 (后文以 A~F 替代)，第 2 类含黑龙江、广西、海南、新疆 4 省 (后文以 T~W 替代)。

#### 3.3 省级电网 DEA 绩效分析结果

图 5、图 6 分别为第 1、2 类省级电网综合技术效率、纯技术效率和规模效率，这里以 1~7 表示 2005~2011，如 C6 表示 2010 年浙江电网。

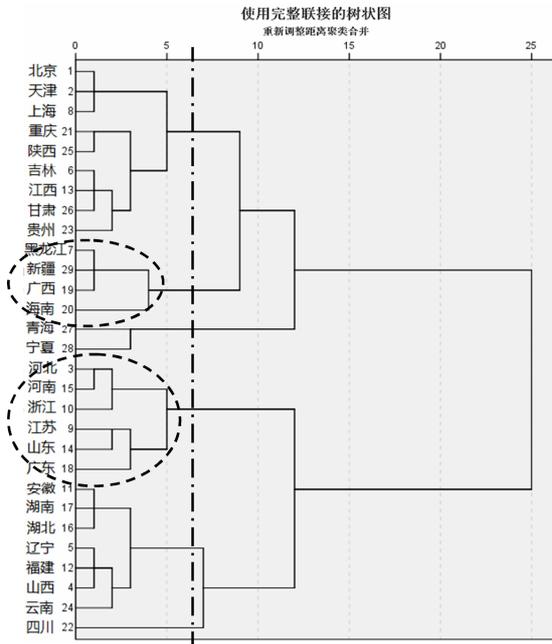


图 4 省级电网 Q 型聚类结果树状图

Fig. 4 Dendrogram of Q-clustering of provincial grids

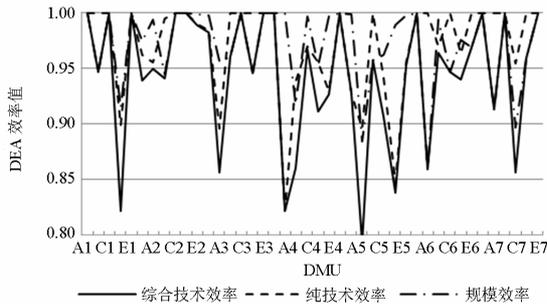


图 5 第 1 类省级电网绩效分析 DEA 效率值

Fig. 5 DEA efficiency of the 1<sup>st</sup>-cluster provincial grids

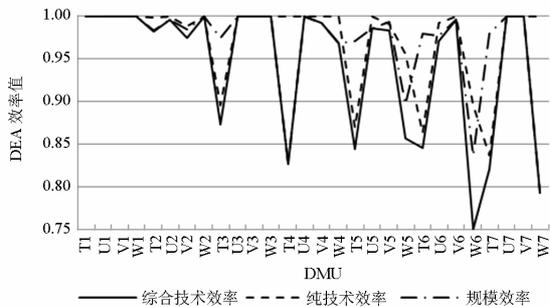


图 6 第 2 类省级电网绩效分析 DEA 效率值

Fig. 6 DEA efficiency of the 2<sup>nd</sup>-cluster provincial grids

由图可知, 两类中电网的绩效水平几乎在 0.8 以上, 分析的 70 个样本中, 24 个相对综合技术效率和规模效率处在效率前沿面上, 40 个纯技术效率在效率前沿面。

### 3.4 投影分析与敏感分析

表 1 为某省级电网的 DEA 效率值和松弛变量值。由表可见影响该省电网绩效原因在 7 年间有所变化, 前 5 年建设投资过多, 后 2 年变电设备容量投入, 该类结果给出了提升绩效的途径。

敏感性分析是通过删除某些指标分析这些指标对 DEA 结果的影响。图 7 为第 1 类省级电网的敏感性分析, 结果显示 A1、A2 两样本对指标 X3、X4 敏感, 而 C4 对这两个指标不敏感。通过敏感性分析, 可以寻找电网绩效提升的侧重点。

表 1 某电网 DEA 绩效分析的松弛变量

Table 1 Slack variables of a provincial grid using

DEA based performance assessment

DMU	效率值	S- (X1)	S- (X2)	S- (X3)	S+ (Y1)	S+ (Y2)	S+ (Y3)	S+ (Y4)
B1	0.946	0	0	200 999	0	1 053.1	0	15.96
B2	0.941	0	0	384 922	0	135	0	12.48
B3	0.96	0	0	256 035	0	0	0	9.16
B4	0.86	0	0	466 952	0	0	0	8.2
B5	0.792	0	0	198 989	0	0	0	6.42
B6	0.859	799.6	0	0	0	0	0.527	3.194
B7	0.913	1 752.2	0	0	0	0	0.59	3.12

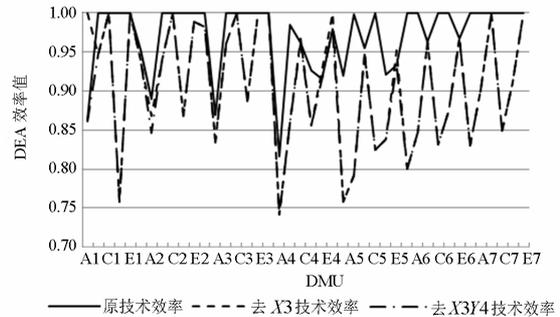


图 7 第 1 类省级电网绩效指标敏感性分析

Fig. 7 Performance sensitive indicators of the 1<sup>st</sup>-category provincial grids

## 4 结论与展望

本文建立了一种基于 DEA 技术的电网绩效分析方法, 在输入输出指标的选取、提高 DMU 的同质性方面提出采用 R、Q 聚类技术进行数据预处理, 解决了电网绩效样本量少, 差异性大等问题, 将两种数据挖掘技术有机结合, 使 DEA 模型更加符合电网分析需求。

本文采用中电联提供的 2005~2011 年省级电网数据对模型进行验证, 结果显示了本文模型的有效性和实用性。

囿于很多数据不便公开, 本文所用的绩效分析指标较少。此外, 本模型还可以考虑采用主成分分析方法, 进一步减少数据量。

### 参考文献

- [1] 毛安家, 何金. 一种基于可信性理论的电网安全性综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 80-87.  
MAO An-jia, HE Jin. An approach of power grid security comprehensive assessment based on credibility theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(18): 80-87.
- [2] 吴杰康, 曾建. 基于收益最大化的水火电联合调度模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 150-158.  
WU Jie-kang, ZENG Jian. Modeling method for scheduling hydro thermal power system based on benefit maximization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 150-158.
- [3] JAMASB T, POLLITT M. Benchmarking and regulation of electricity transmission and distribution utilities: lessons from international experience[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2000.
- [4] Transmission network performance report fiscal year 2008[EB/OL]. <http://www.nationalgridus.com/>.
- [5] National grid electricity system operator incentives: final proposals report[EB/OL]. <http://www.nationalgrid.com/uk/2009>.
- [6] Transmission reliability[R]. BCUC Workshop, 2004.
- [7] Electricity network performance report 2007[EB/OL]. Trans Grid, <http://www.transgrid.com.au/>.
- [8] SP AusNet transmission determination 2008-09 to 2013-14 [EB/OL]. [2008-01]. <http://www.sp-ausnet.com.au/>.
- [9] PAHWA A, FENG Xiao-ming, LUBKEMAN D. Performance evaluation of electric distribution utilities based on data envelopment analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 400-405.
- [10] KWOKA J, POLLITT M. Industry restructuring, mergers and efficiency: evidence from electric power[M]. COPE 0725 & EPRG 0708, 2007.
- [11] AVALOS-GONZALEZ J A, RICO-MELGOZA J J, MADRIGAL M, et al. Total quality management indicators and DEA for benchmarking the Mexican electrical industry[C] // Engineering Management Conference, 2006 IEEE International, Bahia, 2006: 388-392.
- [12] 楼旭明, 窦彩兰, 汪贵浦. 基于 DEA 的中国电力改革绩效相对有效性评价[J]. 当代财经, 2006(4): 90-93.  
LOU Xu-ming, DOU Cai-lan, WANG Gui-fu. Chinese electric power reform performance relative validity evaluation based on DEA[J]. Contemporary Finance & Economics, 2006(4): 90-93.
- [13] 宋艺航, 谭忠富, 于超, 等. 需求侧峰谷分时电价对供电公司购售电风险影响分析模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 183-190.  
SONG Yi-hang, TAN Zhong-fu, YU Chao, et al. Analysis model on the impact of demand-side TOU electricity price on purchasing and selling risk for power supply company[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 183-190.
- [14] 邱威, 张建华, 刘念. 考虑环境因素和电压稳定性的多目标最优潮流[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 190-197.  
QIU Wei, ZHANG Jian-hua, LIU Nian. Multi-objective optimal power flow considering environmental factor and voltage stability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 190-197.
- [15] 魏权龄. 数据包络分析[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-50.
- [16] 徐岩, 刘金生, 张亚刚, 等. 基于模糊聚类理论的电网故障原件定位[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 188-193.  
XU Yan, LIU Jin-sheng, ZHANG Ya-gang, et al. Location of faulty power network component based on fuzzy cluster analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 188-193.
- [17] 刘莉, 王刚, 翟登辉. K-means 聚类算法在负荷曲线分类中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 65-73.  
LIU Li, WANG Gang, ZHAI Deng-hui. Application of K-means clustering algorithm in load curve classification[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 65-73.
- [18] 赵金利, 张群华, 余贻鑫, 等. 输电网网架结构的谱聚类分析算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 8-11.  
ZHAO Jin-li, ZHANG Qun-hua, YU Yi-xin, et al. Spectral clustering approach for structure analysis of transmission networks[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(4): 8-11.
- [19] 周辉, 杨洪耕, 吴传来. 基于灰色聚类的电能质量综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 70-75.  
ZHOU Hui, YANG Hong-geng, WU Chuan-lai. A power quality comprehensive evaluation method based on grey clustering[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 70-75.

收稿日期: 2013-07-03; 修回日期: 2013-08-02

作者简介:

闫志雄(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力经济与电力市场; E-mail: 13852909551@163.com

张宁(1961-), 女, 高工, 研究方向为电网调度、规划计划;

宋红芳(1970-), 女, 高级统计师, 研究方向为电力形势、规划计划。