

# 基于物元综合模型的重点耗能企业电力能效评价研究

卢思瑶<sup>1</sup> 陈 纓<sup>1</sup> 张振雨<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;

2. 东方电气股份有限公司, 四川 成都 610036)

**摘要:** 随着中国能源与环境问题的加剧, 加强节能减排, 提升用电能效, 已成为重点耗能企业亟待解决的课题。针对已有的电力能效评价研究较为依赖决策者的主观判断且忽视了指标之间存在不相容性这些不足, 从经济、技术和管理3个层面构建了基于物元重点耗能企业电力能效评价模型, 并以国内某重点耗能企业为例进行实证研究。结果表明, 物元模型不仅能评价重点耗能企业电力能效的综合水平, 还能揭示其电力能效管理中存在的问题。这为重点耗能企业电力能效管理的改进指明方向。

**关键词:** 重点耗能企业; 电力能效评价; 物元综合模型; 关联度

**Abstract:** With the intensification of energy and environmental problems in China, strengthening energy saving and emission reduction and improving power efficiency have become a decisive and urgent task for key energy-consuming enterprises. Focusing on the fact that less attention is paid to the objectivity of index assignment and the incompatibility between the indexes, a matter-element synthetical model of power energy efficiency evaluation is constructed for key energy-consuming enterprises in China, and the model is used for an empirical research. The results show that the matter-element synthetical model not only can evaluate the comprehensive power energy efficiency level of key energy-consuming enterprises, but also can reveal the power energy efficiency problems in these enterprises, which points out a direction for power energy efficiency management of key energy-consuming enterprises in China.

**Key words:** key energy-consuming enterprises; energy efficiency evaluation; matter-element synthetical model; correlation

中图分类号: F062.9 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0064-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.015

## 0 引言

能源是社会经济发展的基础。在传统工业发展模式的推动下, 中国通过大量的能源消耗换来了快速增长的30年。《世界能源发展报告2015》显示, 2014年中国一次性能源消费总量高达到38.4亿吨标准煤, 占世界能源总消耗量的21.50%, 高居世界第一。能源消耗量的快速增长, 不仅加剧了能源供需的矛盾, 也给生态环境造成了巨大的污染, 能源与环境问题已经成为制约中国经济进一步发展的两大难题。

面对新的发展形势, 加强节能减排, 提升用电能效, 已成为重点耗能企业的必然选择; 但同时应当看到, 长期以来, 中国电力能效的监测与评价的学术工作进展缓慢, 这使得许多已经实施或正在酝酿的电力能效的政策和决策一直缺乏清晰的理论指导, 因

此, 如何在能源短缺和环境污染的双重压力下, 构建一套适合于中国重点耗能企业的电力能效评价方法和体系, 为重点耗能企业的合理用电以及生产优化提供指导, 逐渐成为了学术界研究的焦点。

从已有的理论研究来看, 目前对耗能企业的电力能效评价的研究主要集中在以下几个方面: 1) 基于层次分析法的电力能效评价。文献[1]在构建水泥企业用电能效评价指标体系的基础上, 运用层次分析法进行了相应的能效评价, 并结合评估结果给出了相关的完善建议。文献[2]从定性与定量两个维度构建了企业用电能效评价模型, 并以化工企业为具体对象对上述评价模型的科学性以及合理性进行了检验。2) 基于数据包络分析法的电力能效评价。文献[3]运用包络分析法对火电厂发电机组的用电能耗进行了评价和优化, 并通过优化前后的数据比较验证了上述方法对火电厂改善用电效率的积极影响。文献[4]运用包络模型对2003—2010年

间中国电力产业的总体能源效率进行了评价,并进一步揭示能源效率变化的原因。3) 基于综合模型的电力能效评价。文献[5-6]构建了一个层次分析法和熵权法相融合的综合模型,力图克服决策者主观评价信息的影响,以提高电力能效项目用电效率评价的科学性。文献[7]构建了层次分析法,灰色关联法和模糊评价法相融合的制造企业能效评价模。文献[8]构建了G1群组判断、熵权法以及主成分分析法相融合的能效评价模型。这为耗能企业的用电能效的科学评价提供了新的思路。

以上的研究,为耗能企业的用电能效评价与优化提供了较好的理论指导。但同时应当看到,现有的理论研究还存在一定的不足:首先,无论是层次分析法、还是包络法、熵权法,都普遍较强烈地依赖决策者的主观判断,客观性不够;其次,虽然一些学者逐渐尝试多种方法相融合的构建思路,但大多忽视了各评价指标结果之间不相容性的问题。针对以上不足,将引入物元综合评价这一新方法<sup>[9-10]</sup>,构建一套适用于重点耗能企业用电能效评价的指标体系。此理论创新在于,力图将指标重要性的主观判断、数据的客观处理以及指标间的不相容性纳入到统一的分析框架中,进而为重点耗能企业的用电能效管理提供理论指导和参考。

## 1 重点耗能企业电力能效评价体系设计

构建完整的指标评价体系,是开展重点耗能企业电力能效综合评价的第一步。基于电力能效指标体

系的设置原则以及成熟经验<sup>[1-5]</sup>,同时结合中国重点耗能企业的用电结构、产品结构、生产工艺以及能源管理的特点,通过综合考虑,构建了重点耗能企业能效评价指标体系。该指标体系包括经济、技术和管理3个一级指标体系和11个二级指标体系。其中,一级经济能效指标包括单位产品工序电力能耗、单位产值综合电力能耗以及节能率3个二级指标,一级技术能效指标包括变压器效率、电压总谐波畸变率、电动机运行效率以及电热设备电能利用率4个二级指标,一级管理能效指标包括供电系统测量及监控完备率、节能规划以及规章制度与日常管理3个二级指标。具体的指标构成以及指标标识见图1。

## 2 物元综合评价模型的构建

### 2.1 物元的概念及其评价逻辑

物元分析是用于研究和解决不相容问题的科学理论与方法。在物元分析时,识别物元是第一步。对于任一事物 $N$ ,可以用特征 $c$ 和量值 $v$ 对其进行表述,这个由 $N, c, v$ 所构成的有序三元组 $R = (N, c, v)$ 就是物元。物元综合评价方法的基本逻辑如下:首先,根据事物已有的数据对评价对象进行分级处理,并设定各等级的边界数据范围;其次,将评价对象的指标值代入相关等级的集合中进行多决策指标评价;最后,将评价结果与各等级集合的关联度大小进行比较,关联度越大,表示评价结果与对应的等级集合的默契程度越佳。

### 2.2 重点耗能企业电力能效评价物元矩阵的确定

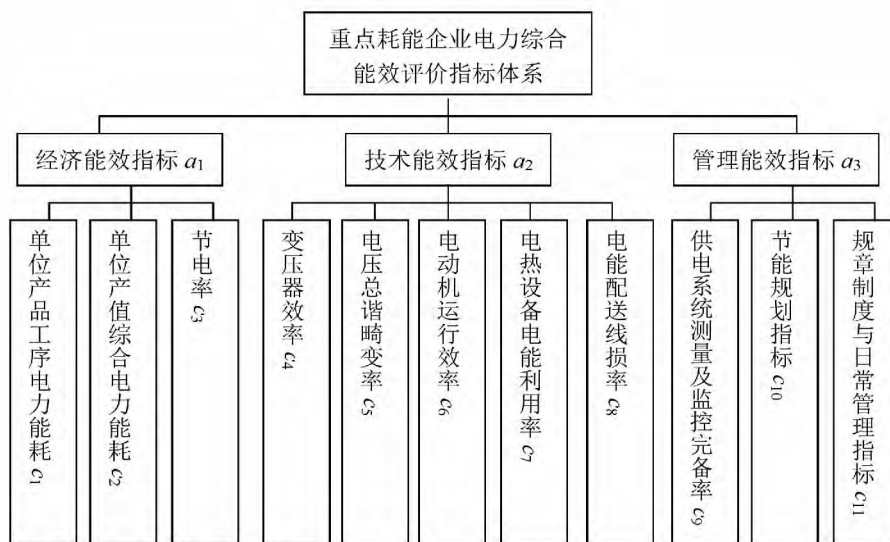


图1 高耗能企业电力能效评价指标体系

根据物元的定义,重点耗能企业电力能效评价的物元矩阵可用式(1)表示:

$$R = \begin{pmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_{11} & v_{11} \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:  $R$  为重点耗能企业电力能效评价物元;  $N$  为重点耗能企业的电力能效水平;  $c_i$  为重点耗能企业电力能效的指标,其中  $i=1, 2, \dots, 11$ , 记作  $c = (c_1, c_2, \dots, c_{11})^T$ ;  $v_i$  为  $N$  关于  $c_i$  的量值,记作  $v = (v_1, v_2, \dots, v_{11})^T$ 。

### 2.3 重点耗能企业电力能效评价经典域与节域的确定

根据式(1)所展示的重点耗能企业电力能效评价物元矩阵,可得重点耗能企业电力能效的经典域为

$$R_j = \begin{pmatrix} N_j & c_1 & v_{j1} \\ & c_2 & v_{j2} \\ & \dots & \dots \\ & c_{11} & v_{j11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_{11} & \langle a_{j11}, b_{j11} \rangle \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R_j$  为重点耗能企业电力能效评价物元;  $N_j$  为所划分的  $j$  个评价等级(等级的多少根据实际情况确定);  $c_i$  为第  $i$  个指标;  $v_{ji}$  为  $N_j$  关于指标  $c_i$  的量值范围,即各个等级关于对应的评价指标标准值的经典域,可用  $v_{ji} = \langle a_{ji}, b_{ji} \rangle$  来表示;  $a_{ji}$  为特征  $c_i$  取值下限值;  $b_{ji}$  为特征  $c_i$  取值上限值。

相应的,重点耗能企业的电力能效的节域可以描述为

$$R_p = \begin{pmatrix} P & c_1 & v_{p1} \\ & c_2 & v_{p2} \\ & \dots & \dots \\ & c_{11} & v_{p11} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P & c_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \dots & \dots \\ & c_{11} & \langle a_{p11}, b_{p11} \rangle \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中:  $R_p$  为重点耗能企业电力能效评价指标允许取值范围的物元;  $P$  为重点耗能企业电力能效等级的全体;  $v_{pi}$  ( $i=1, 2, \dots, 11$ ) 分别为  $P$  关于  $c_i$  的取值范围,即  $P$  的节域,记为  $v_{pi} = \langle a_{pi}, b_{pi} \rangle$  ( $i=1, 2, \dots, 11$ ), 取值的允许范围应满足  $v_{ji} \subset v_{pi}$ 。

### 2.4 指标各等级的关联度的确定

关联度用于表示重点耗能企业电力能效评定指标关于各评价等级  $j$  的归属程度,用  $K_j(v_i)$  描述可拓集合关联度,它的取值范围为整个实数轴。关联

函数计算值如式(4)所示:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} -\frac{\rho(v_i, v_{ji})}{v_{ji}} (v_i \in v_{ji}) \\ \frac{\rho(v_i, v_{ji})}{\rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{ji})} (v_i \notin v_{ji}) \end{cases} \quad (4)$$

计算  $K_j(v_i)$  时,即  $j=1$  当时,在进行第1等级判定计算时,对于正指标(指实际值越大,在能效评价中所起正面效应越大的指标),如果出现  $v_i \geq (a_{p1} + b_{p1})/2$  或者对于负指标(指实际值越小,在能效评价中所起负面效应越大的指标),如果出现  $v_i \leq (a_{p1} + b_{p1})/2$ , 则用式(5)进行计算:

$$K_j(v_i) = \begin{cases} 1 + \frac{\rho(v_i, v_{ji})}{v_{ji}} (v_i \in v_{ji}) \\ \frac{\rho(v_i, v_{ji})}{\rho(v_i, v_{pi}) - \rho(v_i, v_{ji})} (v_i \notin v_{ji}) \end{cases} \quad (5)$$

### 2.5 重点耗能企业电力能效水平第 $j$ 等级关联度的判定

如果指标  $c_i$  的权系数为  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, 11$ ) 且  $\sum \lambda_i = 1$ , 则

$$K_j(p_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i K_j(v_i) \quad (i=1, 2, \dots, 11) \quad (6)$$

值  $K_j(p_0)$  表示  $p$  属于  $p_0$  的程度。进一步若

$$K_j(p_0) = \max K_j(p_0) \quad (7)$$

则评定重点耗能企业电力能效水平为  $j$  等级。

从作用来看,重点耗能企业电力能效的物元评价模型的关联度比模糊数学的隶属度所代表的内涵更为丰富,它能揭示出更多的分异信息。当  $K_j(p_0) > 0$  时,表示重点耗能企业电力能效水平符合第  $j$  级标准的要求,且值越大,符合程度越高;当  $-1 \leq K_j(p_0) \leq 0$  时,表示重点耗能企业电力能效水平不符合第  $j$  级标准的要求,但具备转化为该级标准的条件,且值越大,越易转化;当  $K_j(p_0) < -1$  时,表示重点耗能企业电力能效水平不符合  $j$  级标准的要求,且不具备转化为该级标准的条件,其值越小,表示与某级评判标准的差距就越大。

## 3 案例分析

某公司创建于1958年,是中国大型的重型机械制造企业。经过数十年的持续发展,公司目前总资产已逾百亿元,拥有各类生产设备七千余台;可完成400 t级优质钢锭的浇筑、600 t级优质锻件的锻造以及770 t级优质钢水的冶炼,并可完成大型复杂构

表 1 某公司电力能效评价指标关联度输出表

指标关联度	指标权重	高	较高	中等	低	能效评价
$K_j(v_1)$	0.075	-0.398	-0.130	0.398	-0.223	中等
$K_j(v_2)$	0.065	-0.275	0.303	-0.470	-0.682	较高
$K_j(v_3)$	0.050	-0.470	-0.141	0.202	-0.403	中等
$K_j(v_4)$	0.161	0.267	-0.127	-0.707	-0.833	高
$K_j(v_5)$	0.053	-0.502	-0.250	0.675	-0.555	中等
$K_j(v_6)$	0.290	-0.394	-0.089	0.198	-0.341	中等
$K_j(v_7)$	0.115	-0.278	0.481	-0.351	-0.630	较高
$K_j(v_8)$	0.090	-0.420	-0.223	0.130	-0.048	中等
$K_j(v_9)$	0.036	-0.345	0.156	-0.085	-0.465	较高
$K_j(v_{10})$	0.035	-0.259	0.450	-0.345	-0.618	较高
$K_j(v_{11})$	0.030	-0.103	0.098	-0.512	-0.715	较高
$\Sigma K_j(v_i)$	—	-0.263 5	0.003	-0.070 4	-0.480	较高

建的加工;具备较强的公路、水路、铁路等综合远程运输能力;具备从后端冶炼、锻造、热处理、机械加工、装配等到前端售后服务的一体化能力。但近年来随着企业规模的不断壮大,电力能耗问题逐渐凸现,并成为制约公司发展的关键一环。下面引入物元综合模型对某公司的电力能效进行评价,找出其存在的问题并进行相应改善。在电力能效等的评定上,将其分为 4 个等级,分别为“高”、“较高”、“中等”和“低”

### 3.1 数据的规范化处理

对于那些不能通过客观数据量化的指标,采取主观打分法来确定具体指标的优劣,在操作上,选择了 5 位电力行业的能效专家或学者对某公司电力能耗评价指标各个层级进行打分,然后运用层次分析法 yaaph 软件,计算各指标层级的权重系数。而对可以通过量化得到的指标,则通过无量纲化的处理后评分。运用式(4)计算该公司电力能效评价系统中各二级指标在各等级下的关联度,进一步,运用式(6)和式(7),最终可以得到该公司电力能效指标关联度和综合评价等级。相关的结果如表 1 所示。

### 3.2 结果分析

从表 1 的结算结果来看,虽然某公司最终的电力能效综合评价为“较高”等级,但在 11 项参与评价的指标中,有 5 项指标的评价仅为“中等”等级,低于综合评价水平。这意味着,对某公司而言,如果要在未来的能效管理中确保自身的用电能效处于较高水平状态,那么提高单位产品工序电力能耗、节电

率、电压总谐波畸变率、电动机运行效率、电能配送线损率这几项指标的表现就变得势在必行。

通过以上的案例计算分析可以发现,物元综合评价模型不仅能对重点耗能企业综合电力能效进行评价,而且还可以分析各项具体指标的表现,能够帮助重点耗能企业迅速地找出制约企业电力能效的问题所在,这为重点耗能企业电力能效管理的改进指明方向。

## 4 结 语

随着中国能源与环境问题的不断凸显,提升电力能效已成为重点耗能企业亟待解决的课题。基于这一背景,通过将电力能效指标重要性的主观判断、数据的客观处理以及指标间的不相容性纳入到统一的分析框架中,构建了重点耗能企业用电能效的物元综合评价模型,并以某公司为例,对这一模型的实用性进行了考察。结果显示:基于物元的重点耗能企业电力能效评价模型,可以较好地揭示重点耗能企业的综合电力能效水平以及能效管理中存在的问题,进而为电力能效的进一步提升提供了可行的操作思路。

### 参考文献

- [1] 宋绍剑,薛春伟. 基于层次分析法的水泥企业电力能效评估[J]. 电力学报, 2012, 27(2): 154-157.
- [2] 李正明,张纪华,陈敏洁. 基于层次分析法的企业有

序用电模糊综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 136-141.

[3] 韦杏秋,程鹏飞,陈碧云,等. 火电机组能耗的数据包络分析方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 44-51.

[4] 程雯. DEA 模型的我国电力产业能源效率分析[J]. 经济研究导刊, 2015(7): 45-46.

[5] 李慧玲,芦新波,刘大川,等. 基于 AHP-TOPSIS 的电力能效项目综合评价[J]. 现代电力, 2014, 31(4): 88-94.

[6] 田贺平,杜松怀,韩晓慧,等. 基于 AHP-熵权法的企业电力综合能效评估[J]. 智能电网, 2015, 3(2): 112-118.

[7] 苑帅,王坚,戴毅茹. 基于组合评价方法(AHM-GF)的制造企业综合能效评价研究[J]. 制造业自动化, 2009, 31(3): 21-23.

[8] 罗耀明,毛季帆,姚建刚,等. 电力用户综合能效评估

模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 104-109.

[9] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.

[10] 杨列奎,解佗,张刚,等. 基于物元综合评价法的高耗能企业电力能效评价[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(6): 44-47.

作者简介:

卢思瑶(1986), 硕士研究生、工程师, 研究方向为电力营销与供应链;

陈 纓(1967), 硕士研究生、高级工程师, 国网四川省电力公司博士后创新实践基地博士后合作导师, 研究方向为电力营销与能效评价;

张振雨(1981), 工程师、硕士研究生, 研究方向为电力供应链。

(收稿日期: 2015-12-22)

(上接第 9 页)

## 4 结 论

针对 LSSVM 效率极低的靠经验选取参数的问题, 选定了 PSO 算法作为优化策略, 利用 PSO 算法基于种群的并行搜索策略特点来迭代搜索最优的目标函数值, 以求寻找到最优的 LSSVM 参数, 达到自动优化选取关键参数的目的, 使用基于 PSO-LSSVM 的模型对负荷进行了预测。预测结果验证了所提方法的可行性, 通过与不经优化的 LSSVM 的预测结果进行了对比, 进一步突出了所提方法的有效性和准确性。

### 参考文献

[1] 康操. 基于最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测模型的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

[2] 杨毅强,刘天琪. BP 神经网络负荷预测模型的 L-M 训练算法[J]. 四川电力技术 2006 29(3): 29-31.

[3] Daneshdoost M, Lotfalian M, Bumroongit G, et al. Neural Network with Fuzzy Set-based Classification for Short-term Load Forecasting[J]. Power Systems, IEEE Transactions on. 1998, 13(4): 1386-1391.

[4] 赵宇红,唐耀庚,张韵辉. 基于神经网络和模糊理论的短

期负荷预测[J]. 高电压技术 2006 31(5): 107-110.

[5] 刘绚,刘天琪. 基于小波变换和遗传算法优化神经网络负荷预测[J]. 四川电力技术 2010 33(3): 15-18.

[6] 周林,吕厚军. 人工神经网络应用于电力系统短期负荷预测的研究[J]. 四川电力技术 2008 31(6): 68-72.

[7] 丁世飞,齐丙娟,谭红艳. 支持向量机理论与算法研究综述[J]. 电子科技大学学报 2011 40(1): 2-10.

[8] 李元诚,方廷健,于尔铿. 短期负荷预测的支持向量机方法研究[J]. 中国电机工程学报 2003 23(6): 55-59.

[9] 张林,刘先珊,阴和俊. 基于时间序列的支持向量机在负荷预测中的应用[J]. 电网技术 2004 28(19): 38-41.

[10] 侯贺飞,刘俊勇. 最小二乘支持向量机短期负荷预测研究[J]. 四川电力技术 2009(S1): 11-15.

[11] 罗娜. 数据挖掘中的新方法——支持向量机[J]. 软件导刊 2008(10): 30-31.

[12] Xinxin H, Lijin W, Yiwen Z. An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for Site Index Curve Model[C]. International Conference on Business Management & Electronic Information 2011 3: 838-842.

作者简介:

黎津池(1988), 硕士研究生, 研究方向为基于短期负荷预测含分布式发电的电力系统状态估计。

(收稿日期: 2016-01-28)