

影响冷热电联产系统经济性因素的灰关联分析

冯小平¹, 张蓓红², 龙惟定³

(1. 江南大学 土木工程系, 江苏 无锡 214122; 2. 上海建筑科学研究院, 上海 200032; 3. 同济大学 中德工程学院, 上海 200092)

摘 要: 影响冷热电联产系统运行经济性的因素是多方面的。从多种因素中确定主要影响因素以及各因素之间的主次关系, 是进行系统经济性分析的一个重要内容。本文以灰色理论中的灰关联分析的数学模型, 对上海地区某燃气轮机冷热电联产系统经济性的影响因素进行了分析。结果表明, 根据目前上海市天然气价格、购电价格和售电价格水平, 在燃气轮机效率、燃气轮机投资、天然气价格、购电价格和售电价格 5 种因素中, 天然气价格是影响燃气轮机冷热电联产系统经济性优劣的最显著因素。

关 键 词: 燃气轮机; 冷热电联产; 经济性; 灰关联分析; 关联度

中图分类号: TK472 文献标识码: A

1 引 言

发展天然气冷热电联产项目, 对于削减电网的高峰负荷、缓解能源供需矛盾、提高能源综合利用效率、减轻污染、改善环境、降低因燃料调整带来的成本增加十分有利。燃气轮机冷热电联产运行的经济性是系统应用研究的一个重要内容。而影响系统运行经济性的因素是多方面的。如燃气轮机效率、燃气轮机投资、天然气价格、购电价格、售电价格、国家或地区的能源政策和法规等因素的影响。从多种因素中找出主要影响因素对进行系统经济性分析十分重要。本文以灰色理论中的灰关联度分析的数学模型对影响燃气轮机热热电联产系统经济性的因素进行分析。

灰色理论是 1982 年开始发展起来的一种新理论, 它已跨出控制领域, 技术科学学科, 渗入到社会的多个领域, 取得了良好的经济效益与社会效益。灰色系统理论提供了一种新的分析方法即灰关联度分析法, 它的基本任务是基于因素序列的微观或宏观几何接近程度, 来衡量因素间的关联程度或者是

子因素对母因素(目标值)的贡献程度。

2 灰关联分析方法与步骤

2.1 确定子因素(影响因素)序列和母因素(目标值)序列

设母因素序列为 $\{X_0(k)\}$, 子因素序列为 $\{X_i(k)\}$ ($i=1, 2, 3, \dots, M; k=1, 2, 3, \dots, N$)

其中: i —子因素(影响因素)的个数; k —在不同时刻子因素对母因素的影响值。

2.2 数据的无量纲化处理

在灰色优化过程中, 涉及到不同物理量的参比运算, 须对数据进行无量纲化处理, 对非时间序列, 一般采用均值化处理, 即:

$$\overline{X_i(k)} = X_i(k) / \text{aver}(i) \quad (1)$$

$$\text{aver}(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_i(k) \quad (i = 0, 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, 3, \dots, N)$$

式(1)中 $\overline{X_i(k)}$ 为均值化处理后无量纲数据序列。

2.3 关联系数计算

关联系数反映各子因素与母因素(目标值)接近程度的分散量度, 则第 i 个子因素在 k 时刻与母因素的关联系数按式(2)计算:

$$\xi_{oi}(k) = \frac{[\min_i \min_k |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}| + \rho \times \max_i \max_k |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}|]}{[\max_i \max_k |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}| + \rho \times \min_i \min_k |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}|]} \quad (2)$$

式(2)中:

$\min_i \min_k |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}|$ —二级最小差, 即在进行 $|\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}|$ 计算所得结果的最小值;
 $\max_i \max_k |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}|$ —二级最大差, 即

在进行计算 $|\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}|$ 所得结果的最大值; $|\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}| - k$ 时刻, 第 i 个子因素与母因素对应项值差的绝对值; ρ —分辨系数, 一般为 0.1 ~ 1.0, 通常取 0.5。

2.4 求关联度

关联系数是各子因素与对应的目标差值的反映程度, 为一组二维数据的集合, 信息过于分散, 不利于进行直观比较, 一般将各因素所对应的指标差值特征量集中为一个值, 即求其平均值, 该平均值为关联度, 用 $R(i)$ 表示:

$$R(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (3)$$

2.5 关联度排序

根据式(3)的计算结果, 按其值的大小进行排序, 排在最前面的即为对目标值影响最大的因素。

3 实例分析

上海地区的一燃气轮机冷热电联产项目由约 10 个不同功能的建筑所构成。整体测算的全年冷热电负荷以及小时峰值负荷如表 1 所示。

表 1 全年冷热电负荷以及小时峰值负荷

	全年累计值 /MWh	峰值 /kW
电负荷	69 727	11 022
冷负荷	54 889	38 877
热负荷	38 919	21 723

3.1 确定目标值和影响因素

为分析燃气轮机冷热电联产系统的经济性的影响因素, 选取年度费用(包含系统初投资和年运行能损耗费用)作为目标值。确定燃气轮机效率、燃气轮机投资、天然气价格、购电价格和售电价格 5 个主要因素及其水平数参与试验(见表 2)。试验时每个因素取两个水平。两个水平数分别是基准值的 90%(低值)和 110%(高值)。燃气轮机效率的基准值是根据现有的厂家样本资料获得的, 其投资采用一次方程对现有的价格信息进行拟合, 这是因为燃气轮机每千瓦的投资随容量(x)大小而变化, 一般来说, 小机组每千瓦投资大些, 大机组每千瓦投资小一些。这样, 拟合方程的常数项就代表了投资的固定部分。天然气价格的基准值采用上海市现有热电联产项目的天然气现行价格。购电价格的基准值采用上海市电网销售电价。在假设多余的电力可以上网的前提下, 售电价格的基准值采用上海市现有发电厂平均上网电价。购电价格 0.849 0.569 0.239 元/kWh 分

别表示峰时段/平时段/谷时段的电价。

表 2 燃气轮机热电联产系统影响因素及其水平

	基准值	低值(-)	高值(+)
燃气轮机效率/ $\%$	73~78	66~70	80~86
燃气轮机投资/万元	297.8+0.274x	268+0.247x	327.6+0.301x
天然气价格/元·m ⁻³	1.9	1.7	2.1
购电价格/元·(kWh) ⁻¹	0.943/0.632 0.265	0.849 0.569 0.239	1.037 0.695/0.292
售电价格/元·(kWh) ⁻¹	0.31	0.28	0.34

3.2 模型试验结果

当各因素水平以不同组合出现时, 以年度费用的最小化来作为系统优化的目标函数, 以负荷需求、各组成设备的性能特性和整体的能流平衡作为约束条件, 以此得到在优化的运行策略下的试验指标。经过 32 次全面试验, 其结果如表 3 所示。

3.3 灰关联分析

3.3.1 确定母因素和子因素序列

本例母因素序列为包含系统初投资和年运行能损耗费用在内的年度费用。子因素序列分别为燃气轮机效率、燃气轮机投资、天然气价格、购电价格和售电价格。构造后的母因素和子因素序列见表 3。

3.3.2 关联系数计算

数据先按式(1)进行均值化处理。以年度费用为目标的关系数根据式(2)计算得出 $\xi_{01}(k) = 0.1313 \{ |\overline{X_0(k)} - \overline{X_i(k)}| + 0.1305 \}$ 。

3.3.3 关联度计算

按式(3)计算出各因素与目标之间的关联度如表 4 所示。

3.4 结果分析

由表 4 可以看出, 对年度费用影响显著的 3 个主要因素依次为: 天然气价格、燃气轮机效率和购电价格。燃气轮机投资的影响较小。由于售电价格的基准值较低, 售电价格对系统经济性的影响就更小了。其中, 天然气价格对于燃气轮机热电联产系统经济性的影响是最大的, 它直接决定了年消耗能源的成本支出。燃气轮机效率的影响位居第二, 效率越高, 就意味着能够削减能源费的支出。购电价格的影响相比前两者而言明显小很多, 这是因为对于以自发电为主的热电联产系统而言, 向电网购电只是作为备用, 因此购电的价格不是影响其经济性的最主要因素。

综上所述, 本文基于热力学第一定律和在设计工况条件下对燃气轮机冷热电联产系统进行经济性影响因素的灰关联分析研究, 得出下列的结论: 在燃气轮机效率、燃气轮机投资、天然气价格、购电价格

和售电价格 5 种因素中, 天然气价格是影响燃气轮机冷热电联产系统经济性优劣的最显著因素。

表 3 模型试验结果和构造后的母因素和子因素序列

试验次数 k	燃气轮机效率 $X_1(k)$	燃气轮机投资/万元 $X_2(k)$	天然气价格/元· m^{-3} $X_3(k)$	购电价格/元· kWh^{-1} $X_4(k)$	售电价格/元· kWh^{-1} $X_5(k)$	燃气轮机容量/MW x	年度费用/万元 $X_0(k)$
1	0.78	270.129 1	1.7	0.569	0.28	8.62	4 961.59
2	0.83	330.429 4	1.7	0.569	0.28	9.4	4 433.97
3	0.78	330.170 5	1.7	0.569	0.28	8.54	5 039.15
4	0.83	330.387 3	1.7	0.569	0.28	9.26	4 517.09
5	0.78	269.990 8	2.1	0.569	0.28	8.06	5 605.57
6	0.83	270.188 4	2.1	0.569	0.28	8.86	5 065.18
7	0.78	329.989 9	2.1	0.569	0.28	7.94	5 678.87
8	0.83	330.140 4	2.1	0.569	0.28	8.44	5 144.03
9	0.78	270.316 9	1.7	0.695	0.28	9.38	5 199.73
10	0.83	270.440 4	1.7	0.695	0.28	9.88	4 603.15
11	0.78	330.381 2	1.7	0.695	0.28	9.24	5 282.72
12	0.83	330.501 6	1.7	0.695	0.28	9.64	4 689.56
13	0.78	270.193 4	2.1	0.695	0.28	8.88	5 943.25
14	0.83	270.316 9	2.1	0.695	0.28	9.38	5 306.53
15	0.78	330.200 6	2.1	0.695	0.28	8.64	6 022.58
16	0.83	330.411 3	2.1	0.695	0.28	9.34	5 389.62
17	0.78	270.129 1	1.7	0.569	0.34	8.62	4 959.49
18	0.83	270.381 1	1.7	0.569	0.34	9.64	4 386.92
19	0.78	330.176 6	1.7	0.569	0.34	8.56	5 037.11
20	0.83	330.429 4	1.7	0.569	0.34	9.4	4 471.24
21	0.78	269.990 8	2.1	0.569	0.34	8.06	5 604.48
22	0.83	270.198 3	2.1	0.569	0.34	8.9	5 057.3
23	0.78	329.996	2.1	0.569	0.34	7.96	5 677.8
24	0.83	330.236 8	2.1	0.569	0.34	8.76	5 136.77
25	0.78	270.321 8	1.7	0.695	0.34	9.4	5 197.77
26	0.83	270.450 2	1.7	0.695	0.34	9.92	4 558.25
27	0.78	330.405 3	1.7	0.695	0.34	9.32	5 280.34
28	0.83	330.579 9	1.7	0.695	0.34	9.9	4 645.26
29	0.78	270.193 4	2.1	0.695	0.34	8.88	5 943.75
30	0.83	270.346 5	2.1	0.695	0.34	9.5	5 294.64
31	0.78	330.224 7	2.1	0.695	0.34	8.72	6 022.94
32	0.83	330.429 4	2.1	0.695	0.34	9.4	5 378.54

表 4 各因素与目标之间的关联度

	燃气轮机效率	燃气轮机投资	天然气价格	购电价格	售电价格
年度费用关联度	0.658 2	0.589 2	0.716 3	0.603 1	0.596 8
排序	2	5	1	3	4

4 结束语

(1) 灰关联分析适用于分析时间序列或非时间序列的因素排序, 其突出优点不需要太多的样本, 也不要求数据具有特殊的分布, 是一种值得推广的多因素相关分析方法。

(2) 影响燃气轮机冷热电联产运行的经济性的因素是多方面的。通过本文的分析, 在设计工况条件下, 天然气价格是影响燃气轮机冷热电联产系统经济性最显著的因素。天然气价格越昂贵, 年度能源消耗的支出就越大, 这是目前燃气轮机冷热电联产系统发展的一个主要障碍。

(3) 针对不同的天然气价格水平对燃气轮机冷热电联产系统经济性的影响程度还需要作进一步的研究和探讨。

参考文献:

[1] 张培红, 龙惟定. 热电(冷)联产系统优化配置研究[J]. 暖通空调, 2005, 35(4): 1-4.
 [2] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
 [3] 潘毅群, 黄治钟, 张蓓红, 等. 分布式供能系统在上海某新建医院应用的可行性研究[J]. 暖通空调, 2004, 34(2): 68-72.
 [4] 冯小平, 吴航明. 基于因特网和灰色优化方法的空调冷热源决策系统[J]. 江南大学学报, 2003, 2(4): 368-370.

(何静芳 编辑)

化工动力多联产系统及其集成优化机理 = **Chemical Engineering Power Polygeneration System and Its Integrated Optimization Mechanism**[刊, 汉] / LIN Ru-mou, JIN Hong-guang, GAO Lin (Research Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 331 ~ 337

The theory of system integrated optimization represents a most important scientific issue playing a key role in the development of a polygeneration system. In this regard, relevant research has been carried out under the support of a national major scientific research project. Research results achieved at a substage are described by the authors, including: the basic concept, intrinsic characteristics and specific features of a chemical engineering power polygeneration system along with an exposition of the approaches proposed for the study of the system integration principles as well as the optimization integration means embodying such principles. Moreover, the polygeneration system has been classified into five basic categories on the basis of the system integration structured layers, namely, simple parallel-connected type, synthesized parallel-connected type, simple series-connected type, synthesized series-connected type and series and parallel-connected synthesized type etc. Some specific cases with an analysis of their main characteristics etc. are presented. **Key words:** polygeneration system, chemical engineering and power, integrated optimization, basic types

活性炭床加微波辐射脱硫脱硝的研究 = **A Study of the Desulfuration and Denitration on Active Carbon Beds Provided with Microwave Irradiation**[刊, 汉] / MA Shuang-chen, ZHAO Yi, MA Xiao-ying, et al (Environment College under the North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 338 ~ 341

A brief description is given of the microwave heating principles and the development of microwave chemistry along with an overview of microwave-based desulfuration and denitration. By the use of a microwave device and active carbon, a study of the simulation of flue gas with a simultaneous desulfuration and denitration has been conducted. With the help of this technology, 96% of the carbon monoxide and sulfur dioxide can be directly decomposed into environment-friendly nitrogen as well as valuable and recoverable elementary sulfur. Analyzed is the microwave-induced catalytic reduction-based desulfuration and denitration mechanism, pointing out that the microwave reduces the activation energy of the above-cited removal reactions. This indicates that the microwave not only promotes the process of reactions with its thermal effect but also gives full play to its catalytic action. **Key words:** microwave, desulfuration, denitration, induced catalytic reduction, active carbon

影响冷热电联产系统经济性因素的灰关联分析 = **An Analysis of the Ash Correlation of Various Factors Influencing the Cost-effectiveness of a Combined Refrigeration, Heat and Power Trigeneration System**[刊, 汉] / FENG Xiao-ping (Civil Engineering Department of the Jiangnan University, Wuxi, China, Post Code: 214122), ZHANG Bei-hong (Shanghai Academy of Architectural Science, Shanghai, China, Post Code: 200032), LONG Wei-ding (Sino-German Engineering College under the Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 342 ~ 344

Multifarious are the factors influencing the operational efficiency of a combined heat and power cogeneration system. To identify the major influencing factor and the dominant/subordinate relationship from among a variety of factors constitute an important task for the cost-effectiveness analysis of a system. Analyzed are the factors influencing the cost-effectiveness of a gas turbine based heat and power cogeneration system in Shanghai region by adopting a mathematic model involving an ash correlation analysis in an ashy color theory. The results show that according to the current price of natural gas, electricity purchase and sales price in Shanghai City, one can conclude that among the five factors, namely, gas turbine efficiency, investment outlays for gas turbines, price of natural gas, electricity purchase price and sales price, the natural gas price is the most conspicuous factor having a maximum impact on the cost-effectiveness of the gas turbine based heat-and-power cogeneration system. **Key words:** Gas turbine, heat and power (refrigeration) cogeneration, cost-effectiveness, ash correlation analysis, correlation degree

前缘气膜孔对涡轮静叶冷却效果影响的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Impact of Leading-edge Gas-film Pores on Cooling Effectiveness in Turbine Stator Blades**[刊, 汉] / YANG Fan, ZHENG Hong-tao, LI Zhi-ming (Power and Nuclear Energy Engineering College under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 345 ~ 349