

GIS支持下基于NSGA-II算法的火电厂多目标选址

包伟¹, 姚建刚¹, 李晴¹, 欧阳永熙²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410082)

摘要: 结合以往的火电厂选址标准, 引入环保投资因素作为环保标准的量化指标, 建立火电厂的多目标选址模型。利用地理信息系统(GIS)提供的地理空间信息和分析功能将选址区域划分为若干连续区域单元, 并提取各种选址所需数据。采用多目标遗传理论思想, 通过NSGA-II算法求解得到最终多目标的选址解策略空间, 为火电厂的选址提供了实际可行的解决方案。在后续的选址决策中, 专家可以通过适应性权重等方法进行偏好选择。算例分析表明研究结果具有较强的适用性, 在多目标优化方面对火电厂的选址具有重要意义。

关键词: 火电厂选址; 多目标优化; NSGA-II; 地理信息系统; 电力市场

The multi-objective site selection for thermal power plant based on NSGA-II and GIS

BAO Wei¹, YAO Jian-gang¹, LI Qing¹, OUYANG Yong-xi²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410001, China)

Abstract: Combining the past standards of site selection for thermal power plant, the integrated indexes system including the performances of economy, safety and environment is established. The new structure includes the economic investment by the environmental factors. And a model of multi-objective site selection for thermal power plant is also established. The total site region is divided into many successive units by using the visible function of geography information system (GIS) with removing the invalid unit and extracting data from the various modules. Based on the multi-objective genetic theory and NSGA-II algorithm, this paper can get the strategy spaces of the final site selections, which provides the practical solutions for thermal power plant. In the follow-up decision of the site, experts can get the preference selection through weight adaptive methods. Examples show that the research results have good applicability and are beneficial to optimize the site selection of thermal power plants.

Key words: site selection for thermal power plant; multi-objective optimization; NSGA-II; GIS; electricity market

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0025-04

0 引言

传统的电源选址模型仅以电厂固定投资与年运行费用最小为目标, 而在电力市场环境下, 项目具有不确定性和风险性, 在选址中要考虑企业的投资、收益和可持续发展问题。文献[1,2]利用如层次分析法、三角模糊数综合评价法等对特定的待选厂址进行综合比较, 选出最优的厂址, 但这些方法没有实现整个区域的连续选址。文献[3]利用模糊优化理论实现火电厂选址的优化, 但没有考虑火电厂选址的多目标性问题, 也没有考虑电力市场条件下火电厂由环保要求带来的投资问题。本文结合以往的火电厂选址标准, 提出环保投资因素作为环保标准的量化指标; 建立了火电厂的多目标选址模型。利用地理信息系统(GIS)提供的地理空间信息和分析功能将选址区域划分为若干连续区域单元, 并提取

各种选址所需数据。采用多目标遗传理论思想, 通过NSGA-II算法求解得到最终多目标的选址解策略空间, 为火电厂的选址提供了实际可行的解决方案。在后续的选址决策中, 专家可以通过适应性权重等方法进行偏好选择。

1 火电厂优化选址模型

本文主要参考文献[3]所提出的经济性、可靠型、环保性三个评价标准, 并提出利用环保投资因素作为环保标准的量化指标。

1.1 经济性标准

$$F_a = \beta F_t \quad (1)$$

式中: F_a 为投资的年费用, 元; F_t 为投资总费用, 元; β 为年投资费用率, 是贴现率 i 和使用年限 n 的函数, 它的定义为^[4]

$$\beta = \frac{i}{1 - (1+i)^{-n}} \quad (2)$$

经济性标准的表达式为

$$F_T = F_a + F_v = \beta F_t + F_v \quad (3)$$

$$F_t = \sum_{i=1}^4 c_i x_i \quad (4)$$

式中： F_t 为投资总费用，元； c_i 为单位投资成本； x_i 为土地征用费用、自有铁路的投资费用、输电线路的建设费用及引水工程的费用建设长度(或面积)。

$$F_v = \sum_{i=1}^s (c' l_i + c'' i) m_i + b \times 10^{-6} \times c \times \sum_{j=1}^l \Delta P_j \tau$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^s \frac{m_i Q_i}{29271} = M, 0 \leq m_i \leq U_{i \max} \quad (5)$$

式中： c' 为煤矿向电厂供煤的运行基价，元(km/t)； l_i 为煤矿*i*与电厂的距离，km； c'' 为供煤基价，元/t； m_i 为煤矿*i*向电厂的供煤量，t； Q_i 为煤矿*i*供煤的低位发热量，kJ/kg；29271为标煤的低位发热量，kJ/kg； b 为单位供电煤耗，g/(kW·h)； c 为标煤价格，元/t； ΔP_j 为线路*j*的单位负荷的有功损失，MW； τ 为损耗时间，h； $U_{i \max}$ 为煤矿*i*的最大供煤余量，t； M 为电厂的需煤量，t。

1.2 可靠性标准

借鉴总负荷矩的概念^[5]。将火电厂供电的总负荷矩作为火电厂对电网可靠性标准的反映。负荷矩是线路输送的负荷与输送线路长度的乘积。用火电厂到各负荷点的总负荷矩可以反映电厂对电网安全的影响。总负荷矩*W*的表达式如下：

$$W = \sum_{j=1}^n P_j l_j \quad (6)$$

1.3 环保性标准

污染物排放及其环境影响评价是火电厂选址中的一个重要的考虑因素^[6,7]。考虑到电力市场环境下的火电厂投资建设，可以将满足火电厂选址的环保性标准，转化为环保投资成本。表达式为：

$$F_h = F_\beta + F_k + P_h \quad (7)$$

F_β 为投资费用，即工程建设费、排污设备费、工程设计费。一般火电厂为保护环境安装的主要排污设备为脱硫、脱硝等设备。投资年费用的计算公式如下：

$$F_\beta = \beta F_m \quad (8)$$

式中： F_β 为投资的年费用，元； F_m 为投资总费用，元； β 为年投资费用率。

F_k 为年运行/维护费用包括：

$$F_k = \sum_{i=1}^s f_i \quad (9)$$

式中： F_k 为年运行/维护费用，元； f_i 分别为材料、劳动力、维护费用。

P_h 为电厂环境损失成本

$$P_h = \sum_{i=1}^n (F_{ei} \times G_i) \quad (10)$$

式中： P_h 为征收排污收费带来的环境成本(元/年)； F_{ei} 为第*i*种污染物排放收费标准(元/kg)； G_i 为第*i*种污染物排放总量(kg/年)。

2 算法设计实现

火电厂优化选址问题可以这样描述：将由GIS分析后的可行区域划分为若干个连续单元，设定共有*n*个选址单元，现有*m*个火电厂($m < n$)，如何布置这*m*个火电厂，以使得布置结果按某种标准达到最优。在数学模型上，此问题属于0-1规划问题，属非线性规划范畴。染色体的串长度等于*n*，每一位基因代表一个选址单元，如果第*i*位基因是1，则第*i*个选址单元上布置火电厂，若为0，则不布置火电厂。即每一个染色体由*m*个1型基因和*n-m*个0型基因构成，通过不断的遗传进化计算，*m*个1型基因逐渐分布到最优的选址位置上。用遗传算法解决火电厂最优选址问题的关键是适应度函数的设计以及进行合适的编码、遗传算子的设计。

2.1 火电厂选址的多目标优化模型

适应度函数的设计采用本文的经济性、可靠性和环保性3个目标标准优化模型。

$$\left\{ \begin{array}{l} V - \min: \quad F_- = [F_T, W, F_h]^T \\ \quad \quad \quad F_T = \beta F_t + F_v \\ \quad \quad \quad W = \sum_{j=1}^n P_j y_j \\ \quad \quad \quad F_h = F_\beta + F_k + P_h \end{array} \right.$$

2.2 NSGA-II 算法

NSGA-II算法^[8]是对NSGA算法的改进，相对于NSGA而言，NSGA-II具有以下优点：

(1) 提出新的基于分级的快速非支配排序算法，将计算复杂度由 $O(mN^3)$ 降到 $O(mN^2)$ 。

(2) 提出虚拟适应度的概念。它指目标空间上的每一点与同等级相邻2点之间的局部拥挤距离^[9]。这一方法可自动调整小生镜(niche)，采用拥挤度比较算子代替需要计算复杂的共享参数的取值共享方法，使计算结果在目标空间比较均匀地散布，具有较好的鲁棒性。

(3) 引入精英策略的保优机制, 扩大了采样空间, 经选择后参加繁殖的个体所产生的后代同其父代个体共同竞争来产生下一代种群。

NSGA-II 算法流程如图 1 所示。

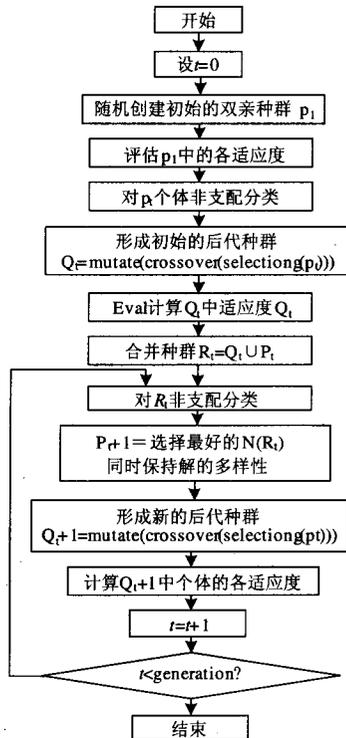


图 1 NSGA-II 算法流程示意图

Fig.1 Flow chart of NSGA-II

2.3 编码设计

根据火电厂优化选址问题的特点, 若采用传统的二进制编码, 在进行交叉和变异操作时, 就会改变基因码 1 的个数从而不断地改变火电厂的数目。为此, 采用二重结构编码来解决这个问题。

二重结构编码方法如图 2 所示。个体染色体表示的二重结构由变量码和附加码两行组成。上行 $s(i)$ 为变量 X_j 的附加码 $s(i)=j$, 下行为变量 X_j 对应于附加码 $s(i)$ 的变量码 $X_j=x_s(i)$ 。

表 1 二重结构编码

Tab.1 Dualistic structure coding

$s(1)$	$s(2)$...	$s(i)$...	$s(n)$
$x_s(1)$	$x_s(2)$...	$x_s(i)$...	$x_s(n)$

对于火电厂优化问题, 上行的附加码就是候选放置选址的节点号码, 这 n 个节点号码随机打乱顺序列于上行。下行的变量码由 m 个 1 和 $(n-m)$ 个 0 组成, 也随机打乱顺序列于下行, 这样就生成了一个个体。

2.4 选择算子设计

选择算子的作用是为了避免有效基因的丢失, 使高性能的个体得以更大的概率生存, 从而提高全局收敛性和计算效率。选择算子采用轮赛制选择与精英策略相结合的选择方法。

轮赛制选择是随机选择 2 个体, 如果非劣解等级不同, 则取等级高(级数小)的个体。否则, 如果 2 点在同一等级上, 则取比较稀疏区域内的点, 因此它可使进化朝非劣解和均匀散布的方向进行。设每一个体 i 的非劣解等级属性和局部拥挤距离属性分别为 i_{rank} 和 i_{dis} , 随机选取 2 个体并进行比较, 保留 1 个优良个体, 淘汰另一较差个体。其过程为 $\text{if } (i_{rank} < i_{dis}) \text{ or } [(i_{rank} = i_{dis}) \text{ and } (i_{dis} > i_{rank})] \text{ then } i > j \text{ or else } i < j$ 。

精英策略即保留父代中的优良个体直接进入子代, 它是遗传算法以概率 1 收敛的必要条件。采用的方法是:

(1) 将父代 P_t 和子代 Q_t 全部个体合成为一个统一的种群 $R_t = P_t \cup Q_t$ 并放入进化池中, 种群 R 的个体数成为 $2N$;

(2) 将种群 R_t 按非劣解等级分类并计算每一个体局部拥挤距离, 依据等级的高低逐一选取个体, 直至个体总数达到 N ;

(3) 以此形成新一轮进化的父代种群 P_{t+1} 其个体数为 N 。在此基础上开始新一轮的选择、交叉和变异, 形成新的子代种群 Q_{t+1} 。

2.5 交叉以及变异算子设计

交叉算子采用对上行附加码采用部分匹配交叉策略 PMX (Partially Matched Crossover), 下行变量码不动, 即交叉过程中只改变选址单元编号在附加码中的排列顺序, 相应地也改变了 1 型基因的分布。PMX 操作要求随机选取两个交叉点, 以便确定一个匹配交叉段, 根据两个父个体中两个交叉点之间的中间段给出的映射关系生成两个子个体^[9]。

对于变异操作, 采用倒位遗传算子。对父个体随机选择两个变异点, 两点间的上行附加码按相反顺序重新排列, 而下行的变量码顺序不变。交叉算子和变异算子都保证了在遗传进化中不断产生新的个体, 而火电厂总数始终保持不变。

2.6 适应度计算

首先解码染色体, 然后按优化数学模型计算每个个体相应的目标函数, 再根据目标函数值进行非劣分层, 计算每层个体的虚拟适应度。虚拟适应度的计算步骤如下:

- (1) 对同层的个体初始化距离。令 $L[i]_{dis}=0$ 。
- (2) 对同层的个体按第 m 目标函数值升序排列。令 $L = \text{sort}(L, m)$ 。
- (3) 使得排序边缘上的个体具有选择优势, 给

定一个大数 $L[1]_{dis}=L[N]_{dis}=M$ 。

(4) 对排序中间的个体，计算拥挤距离为

$$L[i]_{dis}=L[i]_{dis}+L[i+1] \times m-L[i-1] \times M。$$

式中 $L[i] \times m$ 为第 i 个体的第 m 目标函数。

(5) 对不同的目标函数，重复步骤(2)~(4)操作。

3 算例及分析

由于基础数据等方面的限制，本文选取某省某地区建设 1 个火电厂做为虚拟算例来对模型进行求解分析。根据预测，2020 年此地区负荷将达到 1800 MW，缺电情况比较严峻。假设在此地区建设 1 个火电厂，一期工程为 2×600 MW 国产超临界凝汽式燃煤发电机组，采用开式循环系统，同步建设脱硫装置。

标准数据选取 500 kV 输电线路单位投资为 187.22 万元^[10]；线路电阻为 $0.024 \Omega/\text{km}$ ；输电线路的功率因数 $\cos \phi$ 均取 0.95；超临界机组的煤耗用 $325 \text{ g}/(\text{kWh})$ ；标煤价格取为 350 元/t；引水工程(只计输水管路)单位投资为 300 万元 / km；铁路工程单位投资为 1700 万元 / km。

本省煤炭来源主要是攀枝花和平顶山煤矿基地，本文按照由平顶山一个煤源取煤，由于选址范围长宽大约 60 km，所以煤炭运输费用差价忽略不计。投资的贴现率取 6.36%；使用年限 n 均取 25 年；土地价格按市区 90 万元，郊区 70 万元取值。电厂选址征用土地的面积参考同一地区的火电厂取 42 km^2 。

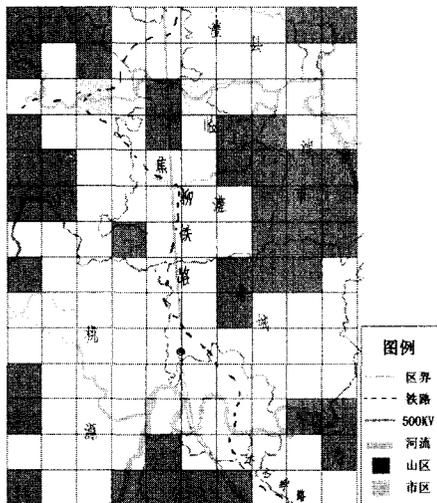


图 2 某地区选址单元

Fig.2 The selection of feasible units

根据《排污费征收标准及计算方法》规定，废气排污费按照排污者排放污染物的种类、数量以污染当量计算征收，每一污染当量征收标准为 0.6 元。

本文各煤矿煤的含硫量取国内煤炭的平均含硫量 1%，脱硫装置效率均取 95%。

利用 ESRI 的 ArcGIS 将待选址地区划分为若干 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$ 的单元，如图 3 所示。按照火电厂建设指标剔出不能建设的单元(山区、市区等)，如图 2 中灰色单元即为不能建厂的地址单元部分。

对剩余单元进行编码，得到 $n=93$ ，取 $m=1$ ，在 Matlab 2007a 环境下，采用 SGALAB Matlab 工具箱中的 SGALAB_MO_NSGA-II 算法程序进行仿真运算，取种群数目为 50，进化代数为 100，得到多目标结果如表 2 所示。

表 2 多目标选址方案

目标	选址单元
经济性	127
可靠性	106
环保性	116

可以看出最终满足多目标优化标准的选址单元都靠近长石铁路以及沅江并且紧邻负荷集中区。选址结果具有地理位置优越、建设条件好、投资少、工期短等优点，满足预先设定的选址要求。规划专家可以根据偏好进行最后的决策。

4 结论

本文结合以往的火电厂选址标准，采用多目标遗传理论思想，提出环保投资因素作为环保标准的量化指标，并通过 NSGA-II 算法求解得到最终多目标的选址解策略空间，为火电厂的选址提供了实际可行的解决方案。在后续的选址决策中，专家可以通过适应性权重等方法进行偏好选择。通过实际算例表明本文对于大范围内火电厂的选址规划有一定参考意义。

参考文献

[1] 吕蓬, 邢棉, 康怡. 火电厂选址最优规划中的层次分析法[J]. 华北电力学院学报, 1994, 21(4): 99-105.
Lü Peng, XING Mian, KANG Yi. Analytic Hierarchy Process of Optimum Programming for Sites of Thermal Power Plants[J]. Journal of North China Inst of Electric Power, 1994, 21(4): 99-105.

[2] 李金颖, 牛东晓, 张世英. 火电厂选址的三角模糊数综合评价方法研究[J]. 数量经济技术经济研究, 2003, (3): 78-81.
LI Jin-ying, NIU Dong-xiao, ZHANG Shi-ying. Research on the Triangle Fuzzy Method of Thermal Power Plants Site Selection[J]. Research on Magnitude & Technology Economy, 2003, (3): 78-81.

(下转第 39 页 continued on page 39)

- Electricity Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(17): 66-71.
- [10] 李益国, 沈炯. 基于 v -支持向量机的边际电价预测及置信区间估计 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2007, 30(1): 70-73.
- LI Yi-guo, SHEN Jiong. System Marginal Price Prediction and Confidence Interval Estimation with V-support Vector Machine[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007,30(1):70-73.
- [11] 贾嵘, 蔡振华, 康睿. 基于最小二乘支持向量机的系统边际电价预测 [J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 145-148.
- JIA Rong, CAI Zhen-hua, KANG Rui. Forecasting System Marginal Price Based on Similarity Search and Least Square Support Vector Machine[J]. High Voltage Engineering, 2006,32(11):145-148.
- [12] Vapnik V, Golowich S, et al. Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation, and Signal Processing[A]. In: Advances in NIPS [C].Cambridge(MA):1997.281-287.
- [13] 邓乃杨, 田英杰. 数据挖掘中的新方法-支持向量机[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 152-154.
- DENG Nai-yang, TIAN Ying-jie. New Method IN Data Mining-Support Vector Machine[M]. Beijing:Science Press, 2004.152-154.
- [14] 孙雅明, 王晨力, 张智晟, 等. 基于蚁群优化算法的电力系统负荷序列的聚类分析[J].中国电机工程学报, 2005, 25(18):40-45.
- SUN Ya-ming, WANG Chen-li, ZHANG Zhi-sheng, et al. Clustering Analysis of Power System Load Series Based on Ant Colony Optimization Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(18):40-45.
- [15] Jain A K, Murty M N, et al, Data Clustering: a Review[J]. ACM Compute Surveys,1999,31(3):264-323.

收稿日期: 2008-02-21; 修回日期: 2008-04-17

作者简介:

刘庆彪 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场理论; E-mail: liu8316@163.com

张步涵 (1950-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统分析, 电力市场, 电能质量方面的研究;

王凯 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析, 网络技术在电力系统中的应用。

(上接第 28 页 continued from page 28)

- [3] 杨勇平, 刘殿海, 杨昆, 等. 火电厂模糊优化选址 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(24): 82-87.
- YANG Yong-ping, LIU Dian-hai, YANG Kun, et al. The Fuzzy Optimization of the Site Selection for Coal-fired Power Plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(24): 82-87.
- [4] 能源部东北电力设计院. 火力发电厂厂址选择手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [5] 刘祥文. 负荷中心的确定方法[J]. 南昌航空工业学院学报, 1998, (1): 63-68.
- LIU Xiang-wen. The Determination Method of Load Center[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 1998, (1): 63-68.
- [6] 姚建刚, 付维生, 陈庆祺, 等. 电力市场中电价与能源及环境保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 71-76.
- YAO Jian-gang, FU WEI-sheng, CHEN Qing-qi, et al. Research About Pricing, Energy Sources and Environmental Protection for Electricity Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(5): 71-76.
- [7] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53-56.
- WEI Xue-hao, ZHOU Hao. Evaluating the Environmental Value Schedule of Pollutants Mitigated in China Thermal Power Industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 53-56.
- [8] Black T D, Stephenson M B. Paving: a New Approach to Automatic Quadrilateral Mesh Generation[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1991, 32(4): 811-847.
- [9] 王小平. 遗传算法理论、应用于软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 138-140.
- WANG Xiao-ping. Genetic Algorithm Theory, Application and Programming[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002. 138-140.
- [10] 电力规划设计总院. 火电、送电、变电工程限额设计控制指标(2002年水平) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

收稿日期: 2008-01-20; 修回日期: 2008-03-05

作者简介:

包伟 (1982-), 男, 硕士研究生. 主要研究方向为电力市场、输电管理以及运营模式、电网规划; E-mail: opaque@126.com

姚建刚 (1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、配电系统自动化和新型输电方式的研究。