

文章编号: 1000-1964(2007)06-0789-05

遗传算法在矿井通风网络优化中的应用

李 江, 陈开岩, 林柏泉

(中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室 能源与安全工程学院 江苏 徐州 221008)

摘要: 建立了矿井通风系统网络优化的非线性规划数学模型, 并用遗传算法来求解该优化模型. 使用罚函数法对优化模型所包含的约束方程进行转化和处理, 使之适用于遗传算法. 罚函数的形式采用不可微精确罚函数, 并在惩罚参数的选择上参考了模拟退火算法的一些优点, 设计出一种动态罚函数. 应用遗传算法对一个简单通风网络的优化模型进行求解. 结果表明: 优化后通风系统总能耗降低了 7.78 kW, 其下降幅度约为 3%.

关键词: 遗传算法; 矿井通风网络; 优化模型; 罚函数; 模拟退火算法

中图分类号: TD 725 **文献标识码:** A

Genetic Algorithm for the Optimization of Mine Ventilation Network

LI Jiang, CHEN Kai-yan, LIN Bai-quan

(State Key Laboratory of Resources and Mine Safety, School of Mining and Safety Engineering,
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: A general non-linear mathematics programming model for optimizing the mine ventilation network was established and solved by genetic algorithm. The penalty function method was used in treating and transforming the constraint equations contained in the optimizing model so as to be suitable for the genetic algorithm. Non-differentiable accurate penalty functions were chosen in treating the constraint equation and the advantages of simulated annealing algorithm was used for reference in determining penalty parameters. On the basis of this, a dynamic penalty function was designed. Then the genetic algorithm was used to solving the optimized model for a simple ventilation network. The result shows that the overall energy consumption of the optimized ventilation system has a decrease of 7.78 kW, with a decreasing rate of 3%.

Key words: genetic algorithms; mine ventilation network; optimization model; penalty functions; simulated annealing algorithms

矿井通风的根本目的就是满足井下各用风地点安全生产对新鲜空气的需要. 因此对流入井下的风流不能放任自流, 必须按需分配. 矿井通风网络是一个关联程度很高的复杂系统, 其中一条分支的风量有可能通过在多条分支中安设调节设施而改

变. 因此, 能满足通风需求的控风方案多种多样. 如何确定一种既能满足通风需求和生产条件的限制、符合有关法规规定, 又能使矿井通风所需的费用最少的控风方案, 是矿井通风安全技术工作者十分关注的问题, 也是长期以来通风界研究的热点和难点

收稿日期: 2007-01-01
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50534090, 50574093); 国家重点基础研究发展(973)计划(2005cb221506); 国家十五重点科技攻关项目(2005BA813B07)
作者简介: 李 江(1978-), 男, 河南省太康县人, 博士研究生, 从事矿井通风系统优化、煤矿安全评价与预测方面的研究.
E-mail: Jiang_Lee_1978@yahoo.com.cn Tel: 0516-83885331

之一。

通风网络中部分风量已知, 部分风量待求, 调节分支和调节量都待求的风量调节问题, 是最一般的通风网络优化调节问题。解决了这一问题, 则通风网络分析中的许多问题都可以迎刃而解。这一问题通常可归结为非线性规划问题, 传统上采用解析法或数值迭代法求解。当目标和约束函数状态较为简单、变量数较少时, 采用解析法求解是有效的, 可得到精确解。但是基于矿体赋存环境的复杂性, 多数最优化设计问题的目标和约束函数状态较复杂而且变量数也较多, 因此常采用数值迭代法求解^[1-2]。但对于通风网络优化问题中普遍存在的多峰现象, 传统的数值迭代法是有局限性的, 往往只能得到局部最优解而得不到全局最优解。因此不少学者开始将已经在其它领域取得很好效果的优化算法引入矿井通风网络优化中, 用来解决矿井风量优化调节问题, 并且已经取得了一定的成果^[3-4]。本文运用遗传算法对矿井通风网络优化问题进行求解, 并探讨其求解全局最优解的可行性。

1 遗传算法简介

遗传算法(Genetic algorithms, 简称 GA)是模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局优化概率搜索算法。它是从代表问题可能潜在解集的一个种群(population)开始的, 而一个种群则由经过基因(gene)编码(coding)的一定数目的个体(individual)组成。每个个体实际上是染色体(chromosome)带有特征的实体。初始代种群产生之后, 仿照生物学中适者生存和优胜劣汰的原理, 逐代(generation)演化产生出越来越好的近似解。在每一代, 根据问题域中个体的适应度(fitness)大小挑选(selection)个体, 并借助于自然遗传学的遗传算子(genetic operators)进行组合交叉(crossover)和变异(mutation), 产生出代表新的解集的种群。这个过程将导致种群像自然进化一样的后代种群比前代更加适应于环境, 末代种群中的最优个体经过解码(decoding), 可以作为问题最优解。

遗传算法与传统优化方法相比有很多的优点, 如对于一些无数值概念或很难有数值概念, 而只有代码概念的优化问题具有独特的优越性; 比较方便求解目标函数是无法或很难求导的函数, 更适合于导数不存在的函数的优化问题, 以及组合优化问题; 全局搜索能力较强, 可以有效的避免陷入局部最优解, 而求得全局最优解等等^[5]。

正因为遗传算法有上述的优点, 因此被广泛的应用在了很多方面, 如电网优化^[6]、公共交通线网优化^[7]等。而矿井通风网络的特点是联接复杂, 大型, 多变量, 因而其优化方法应该具有针对性。遗传算法在理论上是完全可以应用在矿井通风网络优化方面的, 某些特殊优点对弥补传统方法的不足, 具有一定的优越性。因而将遗传算法引入矿井通风网络优化, 从理论上和应用上进行探索性的研究, 是非常重要的和有价值的。

2 优化模型建立

由于能够满足通风需求的控风方案一般不只 1 种, 因此可以给出一定的优化指标, 以比较各种控风方案的优劣, 并在其中选择 1 种最佳的方案。这个优化指标的数学描述就是“目标函数”。在矿井通风调节中应该使控风方案“安全、经济、可行”。安全性和可行性一般可以在需风量、风量与调节量的上下限及分支的可调性中得到反应。因此优化调节问题的目标函数一般都是从经济方面考虑, 即使通风总费用最小。由于通风费用中风机的能耗占有很大的比重, 通常可直接用风机功率作为目标函数。优化调节问题的约束方程即为节点风量平衡方程和回路风压平衡方程, 以及所给定的分支可调性, 各个分支的可调节阻力和风量的上、下限等^[8-9]。

据此建立的矿井通风网络优化的数学模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & W = \sum_{i=1}^{N_F} |H_i| |Q_i|, \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j=1}^N a_{ij} Q_j = 0, \quad (i = 1, 2, \dots, M), \\ & \sum_{j=1}^N b_{ij} H_j - P_i - F_i(Q_i) = 0, \\ & \quad (i = 1, 2, \dots, M), \\ & Q_{\min} \leq Q_i \leq Q_{\max}, \\ & H_{\min} \leq H_j \leq H_{\max}, \end{aligned}$$

式中: W 为通风能耗, kW; N_F 为风机台数; N 为分支数; M 为回路数, $M = N - J + 1$; J 为节点数; H_i 为第 i 个风机的风压, Pa; Q_i 为第 i 个风机的风量, m^3/s ; Q_j 为 j 分支的风量, m^3/s ; H_j 为 j 分支的风压, Pa; P_i 为 i 回路自然风压的代数和, $P_i = \sum_{j=1}^N b_{ij} P_j$, P_j 为 j 分支的自然风压, Pa; $F_i(Q_i)$ 为第 i 个风机的风压, Pa, $F_i(Q_i) = 0, i = N_F + 1, N_F + 2, \dots, M$; Q_{\min}, Q_{\max} 分别为分别风量调节上、下限, m^3/s ; H_{\min}, H_{\max} 分别为风压调节上、下限, Pa;

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & i \text{ 节点为 } j \text{ 分支的端点且 } Q_j \text{ 流向该节点,} \\ -1 & i \text{ 节点为 } j \text{ 分支的端点且 } Q_j \text{ 背离该节点;} \\ 0 & i \text{ 节点不是 } j \text{ 分支的端点;} \end{cases}$$
$$b_{ij} = \begin{cases} 1 & j \in i \text{ 且同向,} \\ -1 & j \in i \text{ 且反向,} \\ 0 & j \notin i. \end{cases}$$

在优化模型的约束条件中,回路风压平衡方程是一个等式约束,就遗传算法而言,它是不能直接处理含有等式约束的优化问题的.一种常用的较为简单的解决方案是将其包含到适应度函数中去,其中罚函数是一种较好的方法.分支风量的上、下限约束也可用罚函数的方法进行处理.节点风量平衡方程主要用来计算各个分支的风量,并且已经在风量的上、下限约束中体现出来.分支的可调节阻力的上、下限约束范围较宽,可以采用抛弃不可行解法加以处理.

罚函数法是通过将约束条件以惩罚项的形式加到目标函数中,共同构成罚函数,得到无约束优化问题.当惩罚因子趋于无穷时,子问题的解就趋向于原问题的解.主要分为外点罚函数法(SUMT)、内点罚函数法、可微精确罚函数法(乘子罚函数)和不可微精确罚函数法.由于遗传算法对问题的可微性没有限制,因此克服了不可微精确罚函数法基于梯度算法而不能处理不可微函数的缺陷,从而能够有效地求得可行的极值点.因此对于罚函数的形式采用不可微精确罚函数^[10-11].

则经过转换过后的目标函数变为

$$W = \sum_{i=1}^{N_F} |H_i| |Q_i| + \gamma \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N b_{ij} H_j - P_i - F_i(Q_i) \right| + \beta \sum_{j=1}^N \left| \min\{0, (Q_{\max} - Q_j)\} + \min\{0, (Q_j - Q_{\min})\} \right|,$$

式中 γ, β 均为罚因子.

在罚函数中惩罚参数,即罚因子的选择是非常重要的.如果罚因子取得过小,会使新目标函数的适应度主要取决于原目标函数的大小,使惩罚失去意义,并有可能导致算法过早地收敛于非极值点;而罚因子取得过大,又会使目标函数的适应度主要取决于“惩罚项”的大小.由于优化模型的可行解可能不只一个,所以会影响解的多样性,使得算法不能收敛于最优解.

为了克服上述缺陷,本文设计了一种动态罚函数法,即惩罚参数是迭代次数的函数.这种动态罚

函数法参考了模拟退火算法的一些优点,可以被称为模拟退火罚函数法,罚因子 σ 定义为

$$\sigma = \frac{1}{T_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1),$$

$$T_{i+1} = \alpha T_i, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1),$$

式中: N 为总进化代数; T_i 原为进化到第 i 代系统的热力学温度,这里仅是一个参数; α 为一个系数, $\alpha \in (0, 1)$. 罚因子 σ 吸取了模拟退火的思想,使 T 逐渐下降,即 σ 逐渐增大,其增加速度由参数来控制.这样随着进化的不断进行, σ 逐渐增大,使解群趋于可行解^[12-13].当然罚因子 σ 也不能无限增大,应通过总进化代数 N 对其进行控制,当进化结束后, σ 将成为一个常量,不再改变.

矿井通风网络优化模型,从目标函数看是要求一个最小值.而遗传算法是不能直接应用于最小值问题的,因此不能使用目标函数直接作为适应度函数.需要对目标函数进行转换,我们采取的转化方式为

$$\text{Fit}(f(x)) = -f(x).$$

3 优化实例

图 1 为一多风机通风网络图,共有 17 条分支,11 个节点,独立回路数为 $17-11+1=7$ 条,风机为 3 台,分别为分支 1, 2 和 3. 出风节点 11 与进风节点 1 之间的伪分支 17 没有画出^[11].

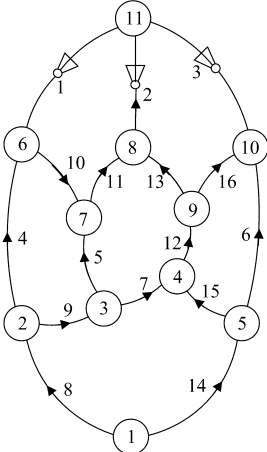


图 1 多风机通风网络
Fig. 1 A multiple-fan ventilation network

假设的用风分支为 5 条,分别为分支 4, 5, 6, 10 和 12, 用加“*”来表示,其固定风量分别为 26, 31, 31, 1 和 32 m^3/s .各个分支风阻值的具体数据在表 1 中列出,分支风量是在风机分支风量固定的情况下自然分风所得出的结果.

该网络的 7 条余树分支分别为: 2-(-3)-(-16), 10, 12. 则 7 条独立回路分别为: 2-(-3)-(-16)

—13;4—1—17—8;5—11—(—13)—16—3—17—
8—9;6—3—17—14;7—(—15)—(—14)—8—9;
10—11—(—13)—(—16)—3—(—1);12—16—3
—17—14—15. 其中负号代表风流方向与图 1 所示

表 1 多风机通风网络原始数据和计算结果

Table 1 Primary data and computed results of a multiple fan ventilation network							
分支号	始节点	末节点	风阻/(N ° s ° m ⁻⁸)	优化前风量/(m ³ ° s ⁻¹)	优化后风量/(m ³ ° s ⁻¹)	阻力可调否	调节量/kPa
1	6	11	0.80	25.00	25.00	是	1.638
2	8	11	0.12	60.00	54.94	是	2.182
3	10	11	0.34	35.00	40.06	是	2.217
4*	2	6	1.20	29.78	26.00	是	0
5*	3	7	1.00	28.97	31.00	是	0
6*	5	10	1.20	30.28	31.00	是	0
7	3	4	0.65	5.10	4.78	是	0
8	1	2	0.08	63.85	61.78	是	0
9	2	3	0.20	34.07	35.78	是	0
10*	6	7	0.30	4.78	1.00	是	0.349
11	7	8	0.32	33.75	32.00	是	0
12*	4	9	1.00	30.97	32.00	是	0
13	9	8	0.33	26.25	22.94	是	0
14	1	5	0.14	56.15	28.22	是	0
15	5	4	0.20	25.87	27.22	是	0
16	9	10	0.30	4.72	9.06	是	0
17	11	1	0.00	120.00	121.00	否	0

注: * 表示固定风量的用风分支.

优化结果是否可以被接受不仅要看其目标函数,还必须符合实际的情况,因此一定要对优化结果进行检验.较为常用的方法就是将结果带入风网解算的程序中加以验证.如果优化中的每一条定流分支在解算结果中都能满足其所需风量,就说明优化结果是较为优秀的,反之则说明还有改进提高的必要.因此将上例的优化结果带入风网解算程序,其结果见表 2.结果基本能满足需风量的要求.

就优化的目标来讲,优化结果数据中的风机总能耗应该与优化前的总能耗作一比较,如果总能耗比优化前有所降低,则说明优化起到了一定的效果,优化结果就是可以接受的.反之,则说明优化没有起到作用.

对于本例而言,优化前后的风机总能耗比较见

表 3 通风总能耗比较

Table 3 Comparison between total ventilation power consumption						
分支号	优化前		优化后		优化方案实施结果	
	风量/(m ³ ° s ⁻¹)	调节量/kPa	风量/(m ³ ° s ⁻¹)	调节量/kPa	风量/(m ³ ° s ⁻¹)	调节量/kPa
1	25.00	2.055	25.00	1.916	25.00	1.937
2	60.00	2.315	54.94	2.179	54.94	2.196
3	35.00	2.046	40.06	2.055	40.06	2.123
总能耗/kW	261.98		249.71		254.20	

4 结 论

1) 作为矿井通风系统网络优化模型,以风机能耗为目标函数,以矿井通风网路节点风量平衡方程、回路风压平衡方程、分支可调性、风量和调节量

的风流方向相反.
运行程序迭代计算后的结果列在表 1 中.对于装机分支其调节量即为风机的负压.

表 3. 从实施结果来看通风系统总能耗降低了 7.78 kW,其下降幅度约为 3%.因此这一优化结果是可以接受的.

表 2 多风机通风网络风网解算结果
Table 2 Results of ventilation network calculation on a multiple fan ventilation network

分支号	风量/(m ³ ° s ⁻¹)	调节量/kPa	分支号	风量/(m ³ ° s ⁻¹)	调节量/kPa
1	25.00	1.916	10*	1.03	0.011
2	54.94	2.179	11	31.40	0
3	40.06	2.055	12*	32.11	0
4*	26.03	0	13	23.54	0
5*	30.37	0	14	57.57	0
6*	31.48	0	15	26.09	0
7	6.02	0	16	8.58	0
8	62.43	0	17	120.00	0
9	36.39	0			

注: * 表示固定风量的用风分支.

上下限等为约束方程的非线性规划数学模型,能够在满足通风需求和生产条件的限制、符合有关法规规定的基础上,使矿井通风所需的费用最少这一优化目标.因而适用于求解各种矿井通风网络优化调节问题.

2) 参考模拟退火算法的一些优点, 设计出一种动态的不可微精确罚函数法, 即模拟退火罚函数法, 对矿井通风系统网络优化模型的约束方程进行处理, 较好的解决了遗传算法不能用于处理含有等式约束的优化问题的缺陷, 使遗传算法能够应用于矿井通风系统网络优化模型。

3) 通过将遗传算法应用于一个简单的多风机通风网络, 对该网络风流量优化控制问题进行求解, 计算结果表明通风系统总能耗降低了 7.78 kW, 下降了约 3%。说明遗传算法克服了传统通风网络优化算法的某些局限性, 能以很大的概率找到所求问题的全局最优解。并且拥有算法先进、可靠性好, 适用性广等优点。

参考文献:

- [1] 黄元平, 李湖生. 矿井通风网络优化调节问题的非线性规划解法[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 14-20.
HUANG Yuan-ping, LI Hu-sheng. Solution of problems relevant to optimal control of mine ventilation network by non-linear programming technique[J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20(1): 14-20.
- [2] 李湖生. 矿井按需分风优化调节的研究进展[J]. 矿业安全与环保, 1997, 1: 8-11.
LI Hu-sheng. Development of optimized regulation of air distribution according to demand in mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1997, 1: 8-11.
- [3] 钟茂华, 陈宝智. 基于遗传算法的矿井火灾时期风流优化控制[J]. 煤炭学报, 1998, 23(2): 161-164.
ZHONG Mao-hua, CHEN Bao-zhi. Optimal control of airflow in a mine fire based on genetic algorithm[J]. Journal of China Coal Society, 1998, 23(2): 161-164.
- [4] 张玉祥, 杨昌玲. 快速模拟退火算法及矿井通风网络全局优化[J]. 武汉工业大学学报, 1998, 20(1): 40-42.
ZHANG Yu-xiang, YANG Chang-ling. A fast simulated annealing algorithm and its application to global optimal design of ventilation network in mine[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1998, 20(1): 40-42.
- [5] 王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 7.
- [6] 谢敬东, 王磊, 唐国庆. 遗传算法在多目标电网优化规划中的应用[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 20-22.
- [7] 冯树民, 陈洪仁. 公共交通线网优化研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(5): 691-693.
FENG Shu-min, CHEN Hong-ren. Study of public transit network optimization method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(5): 691-693.
- [8] 张惠忱. 计算机在矿井通风中的应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 12-20.
- [9] 王战权, 赵朝义, 云庆夏. 用遗传算法进行通风系统优化的研究[J]. 矿业安全与环保, 1999, 6: 6-8.
WANG Zhan-quan, ZHAO Chao-yi, YUN Qing-xia. Research on optimization of ventilation system by genetic algorithm[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 1999, 6: 6-8.
- [10] 解可新, 韩立兴, 林友联. 最优化方法[M]. 天津: 天津大学出版社, 1997: 152-164.
- [11] 郭伟, 席裕庚. 基于精确罚函数法的遗传算法求解时延约束组播路由问题[J]. 电子学报, 2001, 29(4): 506-509.
GUO Wei, XI Yu-geng. Solving delay constrained multicast routing problem with genetic algorithm based on accuracy penalty function[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(4): 506-509.
- [12] 吴志远, 邵惠鹤, 吴新余. 基于遗传算法的退火精确罚函数非线性约束优化方法[J]. 控制与决策, 1998, 13(2): 136-140.
WU Zhi-yuan, SHAO Hui-he, WU Xin-yu. Annealing accuracy penalty function based nonlinear constrained optimization method with genetic algorithms[J]. Control and Decision, 1998, 13(2): 136-140.
- [13] 严刚峰, 赵宪生. 基于模拟退火-遗传算法的过程控制参数寻优研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2003, 40(5): 874-877.
YAN Gang-feng, ZHAO Xian-sheng. The research of based on simulated annealing and genetic algorithm's optimal selection of controls parameter[J]. Journal of Sichuan University: Natural Science Edition, 2003, 40(5): 874-877.

(责任编辑 王继红)