

文章编号: 1001-0920(2012)10-0000-00

矿井通风网络的递阶文化优化方法

郭一楠, 程 健, 刘丹丹, 王 辉

(中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 针对矿井通风网络优化问题, 借鉴文化算法的双层进化结构, 提出一种递阶文化算法. 算法种群空间采用分层遗传算法, 引入递阶编码描述通风网络支路结构, 并给出相应的不可行支路修复算子和可行调节支路阻值调节算子; 信度空间采用统计学习方法提取公共优势支路作为知识, 指导种群空间进化过程中的可调支路选取. 仿真结果表明, 该算法获得的最优控风方案满足控风要求, 且所得方案的加阻值总和最小, 所需调风成本更低.

关键词: 文化算法; 递阶; 知识; 矿井通风网络

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Mine ventilation network optimization adopting hierarchy cultural algorithm

GUO Yi-nan, CHENG Jian, LIU Dan-dan, WANG Hui

(College of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China. Correspondent: GUO Yi-nan, E-mail: nanfly@126.com)

Abstract: Aiming at mine ventilation network optimization problems, a hierarchy cultural algorithm is proposed by adapting dual structure of cultural algorithm. In the population space, the hierarchy genetic algorithm is adapted. Hierarchy code method is introduced to describe the branch structure of ventilation network. The repair operator for infeasible branches and the regulation operator for feasible branches' resistance are given. In the belief space, common dominating branches are extracted as knowledge by statistical learning method and used to guide the selection of adjustable branches in the evolution. Simulation results show that the optimal scheme obtained by the proposed algorithm can meet the needs of air control and has the minimum total resistance. That is, it has the less cost for air control than others.

Key words: cultural algorithm; hierarchy; knowledge; mine ventilation network

1 引 言

矿井通风是指借助于机械或自然风压, 向井下各用风点连续输送适量的新鲜空气^[1], 以满足井下安全生产需求. 为了满足井下各用风地点对新鲜空气的需要, 流入井下风流需要进行按需分配, 构成矿井通风网络. 它是一个关联度很高的复杂系统, 当改变通风网络中某些分支的风量时, 可能会影响其他分支的风量. 通常一个通风网络中能够满足通风需求的控风方案有很多种, 如何确定一种既能满足通风需求和生产条件限制, 又能使矿井通风所需费用最少的控风方案, 是保障矿井通风安全的关键.

在矿井通风网络优化问题中, 通常通风网络中各支路的自然风量已知, 需要在满足回路通风流量为零的条件下, 选择调节风量的分支, 并确定其调节量, 使

支路调节量之和最小. 因此, 矿井通风网络优化本质是一类含约束的混合变量优化问题. 该类问题通常采用通路法、图论、双树解法等^[2]传统迭代方法计算求解. 这种传统电解算方法计算效率较低. 随着智能计算的发展, 模拟退火算法^[3]、遗传算法^[4]被用于解决矿井通风网络优化问题. 然而, 由于未充分利用隐含在进化过程中的有效信息, 使算法的进化性能受限. 文化算法采用由种群空间和信度空间构成的双层进化结构, 对进化信息进行有效提取和管理, 并将其用于指导种群空间的进化过程^[5-7]. 该算法为各类知识的合理利用提供了一种通用框架. 因此, 本文结合问题特征, 提出了一种递阶文化算法来解决矿井通风网络优化问题.

递阶文化算法中, 种群空间采用分层遗传算法,

收稿日期: 2011-04-21; 修回日期: 2011-12-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60805025); 江苏省自然科学基金项目(BK2010183).

作者简介: 郭一楠(1975—), 女, 教授, 博士, 从事智能优化、网络控制系统等研究; 程健(1974—), 男, 副教授, 从事智能优化、机器学习的研究.

实现调节支路的组合优化和调节量的匹配; 信度空间以知识形式保存进化过程中的公共优势支路信息, 并用于指导种群空间的控风方案优化过程。

2 通风网络优化问题描述

在矿井通风调节中要求调阻方案“安全、经济、可行”。安全性和可行性一般可在需风量、风量与调节量的上下限及支路的可调性中得到反映。因此, 本文的优化目标主要从经济性的角度, 考虑调阻的总费用最小, 即通风网络调阻的总和最小。假设 F 为被调总阻值, N_H 为被调阻支路数, 则有

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_H} \Delta H_i. \quad (1)$$

以如图1所示的5节点矿井通风网络为例, 给出通风网络优化目标。图1中, 出风节点5与进风节点1之间的分支9未画出; 箭头表示分支的风流流向。设控风方案中调节支路为1, 2, 4和7, 调节支路对应的调阻值分别为 ΔH_1 , ΔH_2 , ΔH_4 和 ΔH_7 , 则此时优化目标函数为

$$F = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_4 + \Delta H_7.$$

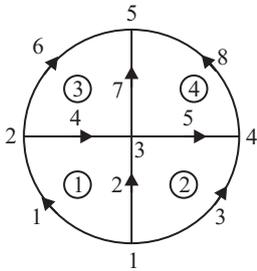


图1 矿井通风网络示意图

通风网络风量遵守风量平衡定律和风压平衡定律^[1]。因此, 优化调节问题的约束方程表示为节点风量平衡方程和回路风压平衡方程。

1) 风量平衡定律是指通风网络中, 流入任一节点风量等于流出风量, 则节点风量平衡方程为

$$\sum_{j=1}^{N_1} a_{ij} Q_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, J. \quad (2)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{支路 } j \text{ 的风流流入节点 } i; \\ -1, & \text{支路 } j \text{ 的风流流出节点 } i; \\ 0, & \text{支路 } j \text{ 与节点 } i \text{ 不相连.} \end{cases} \quad (3)$$

其中: N_1 为网络中一个节点支路风道总条数, Q_j 为支路 j 的风量, J 为通风网络节点数。

以图1中的节点2为例, 与节点2相连的支路有1, 4和6。其中, 支路1的风流是流入节点2, 支路4和6的风流则是流出节点2。设支路1, 4和6的风量分别为 Q_1 , Q_4 和 Q_6 , 则节点2的风量平衡方程为 $Q_1 - Q_4 - Q_6 = 0$ 。

2) 回路风压平衡定律是指通风网络中, 对任一闭

合回路, 各种能量的代数和等于零, 则回路风压平衡方程为

$$\sum_{j=1}^{N_2} b_{ij} (H_j - P_j - H_{fj}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{支路 } j \text{ 属于回路 } i \text{ 且风流流向为顺时针;} \\ -1, & \text{支路 } j \text{ 属于回路 } i \text{ 且风流流向为逆时针;} \\ 1, & \text{支路 } j \text{ 不属于回路 } i. \end{cases} \quad (5)$$

其中: N_2 为闭合回路中所包含的支路数; M 为通风网络回路数; H_j , P_j , H_{fj} 分别为支路 j 的风压、自然风压、风机风压。

以图1中的回路④为例, 该回路包括支路5, 7和8。其中, 支路7为顺时针风向, 支路5和8为逆时针风向。设各支路的风压、自然风压、风机风压分别为: H_5 , P_5 , H_{f5} ; H_7 , P_7 , H_{f7} ; H_8 , P_8 , H_{f8} 。则回路④的风压平衡方程为

$$(H_7 - P_7 - H_{f7}) - (H_5 - P_5 - H_{f5}) - (H_8 - P_8 - H_{f8}) = 0.$$

综合上述两类问题约束, 建立矿井通风网络优化的数学模型为

$$\min F = \sum_{i=1}^{N_H} \Delta H_i. \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^{N_1} a_{ij} Q_j = 0, \quad i = 1, 2, \dots, J;$$

$$\sum_{j=1}^{N_2} b_{ij} (H_j - P_j - H_{fj}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, M;$$

$$Q_{\min} \leq Q_j \leq Q_{\max};$$

$$H_{\min} \leq H_j \leq H_{\max}.$$

其中: Q_{\min} , Q_{\max} 分别为支路风量调节下限和上限; H_{\min} , H_{\max} 分别为支路风压调节下限和上限。

3 基于递阶文化算法的通风网络优化方法

递阶文化算法由下层种群空间和上层信度空间构成。下层种群空间采用分层遗传算法, 通过进化操作优化调节支路组合, 依据约束条件调整支路调节量, 并提供样本个体给信度空间。上层信度空间将待优化问题的特征以常识知识的形式进行描述, 并从样本个体中提取进化过程中隐含的公共优势支路信息, 以进化知识的形式进行描述和存储; 然后, 将常识知识和进化知识有机结合, 共同指导种群空间的个体的进化。由此可见, 算法的关键问题为: 1) 种群空间的进化操作和修复操作; 2) 信度空间知识的提取、描述及利用。

3.1 种群空间的进化操作和修复算子

递阶文化算法的种群空间采用分层遗传算法, 在

遗传算法的进化操作下产生新的调解支路组合,并在知识引导的修复算子的作用下,修复不可行算子,并调解支路的调节量。

3.1.1 分层遗传算法的进化操作

种群空间的分层遗传算法中,需要考虑适合问题的个体编码方式和进化操作。

1) 个体编码方式。

矿井通风网络优化问题中,决策变量由调节支路和调节支路的调节风阻两部分构成。根据变量特点,采用递阶编码^[8]如图 2 所示。

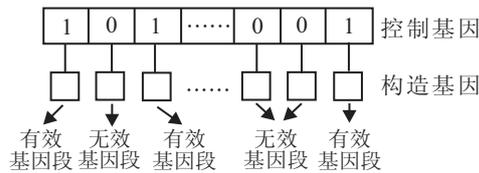


图 2 递阶编码结构

采用递阶编码的个体 $x_i(t)$ 表示为 $\{x_i^1(t), x_i^2(t)\}$ 。其中: $x_i^1(t)$ 为个体的控制基因,采用二进制编码描述支路是否进行调节。若待优化通风网络中包含支路总数为 N ,则编码长度 $n = N$ 。个体 $x_i(t)$ 的第 j 位控制基因 $x_{ij}^1(t)$ 的取值根据支路 j 是否为调节支路确定,即

$$x_{ij}^1(t) = \begin{cases} 1, & \text{支路 } j \text{ 调阻;} \\ 0, & \text{支路 } j \text{ 不调阻。} \end{cases} \quad (7)$$

$x_i^2(t)$ 为个体的构造基因,采用实数编码记录支路的调阻值。控制基因位取“1”时,对应的构造基因位为激活状态,是有效基因段。控制基因位取“0”表示该构造基因位在休眠状态,是无效基因位。

算法采用通风网络调阻的总和作为评判标准,该问题是最小化问题,因此需要将目标值转换为适应度,则个体的适应度可表示为

$$F(x_i(t)) = - \sum_{j=1}^N x_{ij}^1(t) \cdot x_{ij}^2(t), \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (8)$$

2) 交叉操作。

在交叉操作中,配对个体的控制基因部分依据交叉概率进行单点交叉。构造基因位的交叉操作与其对应控制基因位的数值有关。设交叉操作的父代个体为 $x_1(t), x_2(t)$,选取第 c 位为交叉位,则控制基因位的交叉操作存在以下两种情况:

① 若

$(x_{1j}^1(t) \neq x_{2j}^1(t)) \vee (x_{1j}^1(t) = x_{2j}^1(t) = 0), j \geq c$,构造基因位跟随其控制基因位进行交换操作,即 $x_{1j}^2(t) = x_{2j}^2(t), x_{2j}^2(t) = x_{1j}^2(t)$ 。

② 若 $x_{1j}^1(t) = x_{2j}^1(t) = 1, j \geq c$,构造基因位作均匀算术交叉。本文选取 $\alpha = 0.6$,则有

$$\begin{aligned} x_{1j}^{C2}(t) &= \alpha x_{2j}^2(t) + (1 - \alpha)x_{1j}^2(t), \\ x_{2j}^{C2}(t) &= \alpha x_{1j}^2(t) + (1 - \alpha)x_{2j}^2(t). \end{aligned} \quad (9)$$

3) 变异操作。

从个体的控制基因位中随机选取一位作基本位变异,若控制基因位值由“0”变异为“1”,此时增加了一条调节支路,因此需产生该调节支路相对于的调节量,则随机生成一个调节量赋予该控制基因位对应的构造基因位;若控制基因位值由“1”变异为“0”,则取消了该调节支路,其对应的构造基因位取值为 0,即

$$x_{ij}^2(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } x_{ij}^1(t) = 0; \\ (u_j - l_j) \cdot R_{\text{num}}, & \text{if } x_{ij}^1(t) = 1. \end{cases} \quad (10)$$

其中: u_j, l_j 为支路 j 调节量的上下限; $R_{\text{num}} \sim U(0, 1)$ 为服从均匀分布的随机数。

3.1.2 修复算子

算法中的修复算子实现两种修复作用: 1) 修复个体中不可行的支路组合; 2) 修复可行支路组合中调节支路的调阻值,使其满足风压平衡方程。

1) 修复不可行的支路组合。

根据信度空间的常识知识判断个体中支路组合是否可行。若不可行,则需要对该个体进行修复,具体步骤如下:

Step 1: 选取调节支路中关联度最大的支路,使其控制基因位的值为“0”。这里的关联度是指包含该支路的回路数。关联度越大,则调节该支路影响到的回路越多。

Step 2: 选取关联度较小的可调支路加入,使其控制基因位取值为“1”,并随机生成一个调节量赋值给该调节支路对应的构造基因位。

以图 1 所示的通风网络为例,设调节支路为支路 1, 2, 3 和 7。回路③和④的调节支路只有支路 7。显然,调节支路 7 的阻值不能同时满足回路③和④的约束,因此需要修复该个体。支路 1 只属于回路①,因此其关联度为 1;同理,支路 2, 3, 7 的关联度分别为 2, 1, 2。关联度最大的支路为支路 2 和 7。若去除支路 7,再加入支路后,个体仍不可行;而去掉支路 2,可选取关联度为 1 的支路 6 加入。

2) 修复支路的调节量。

当回路风压方程平衡时,节点风量平衡方程也被满足,因此只根据回路风压平衡方程调节支路的调节量。为了使各个回路都满足风压平衡方程,根据回路包含的可调支路多少确定调节回路的次序。先调节包含可调支路最少的回路,再依次调节其他回路,直至满足约束条件。

以图 1 所示的通风网络为例,设调节支路为支

路1, 2, 5和7, 则先调节支路7, 使回路③满足约束条件; 再依次调节支路5, 2, 1, 使回路④, ②和①分别满足约束要求。

3.2 信度空间知识描述及利用

3.2.1 常识知识

在矿井通风网络优化问题中, 由于实际环境的限制, 一些支路的阻值是不能改变的, 因此在选择调阻支路时应从可改变阻值的支路中选取调阻支路. 另外, 有些支路的组合不能修复. 如图1中, 若调节支路组合为支路1, 2, 3, 7, 此时, 回路③和④共有一条可调支路7, 只调节支路7的调节量不能同时满足回路③和④的风压平衡方程, 则此时该调节支路组合是不能修复的. 因此, 常识知识包含两类: 1) 记录已知的可调支路; 2) 禁忌支路组合。

1) 可调支路信息用于在进化过程中指导种群初始化. 在新个体生成时, 为选取调节支路提供可调支路信息, 避免选取的支路为不可调阻的支路. 可调支路集合记为

$$E = \{e_1, e_2, \dots, e_N\}. \quad (11)$$

$$e_i = \begin{cases} 1, & \text{支路 } i \text{ 可调;} \\ 0, & \text{支路 } i \text{ 不可调.} \end{cases}$$

2) 禁忌支路组合. 若支路*i*是回路*j*和回路*k*的公共支路, 且该个体不包含回路*j*和回路*k*包含的其他可调支路, 则该个体为禁忌支路组合. 禁忌支路组合用于指导个体修复过程, 是个体可行性的判断依据. 当种群中有个体符合禁忌支路组合条件时, 则判定该个体为不可行解。

3.2.2 进化知识的提前及利用

进化过程中, 多个优势个体可能会包含同一条可调支路, 即较优个体的控制基因存在公共性. 因为不同的可调支路组合中, 相同调节支路的调阻值并不相同, 所以构造基因不存在公共性. 因此, 本文进化知识反映了进化过程中较优个体控制基因位的公共特性. 记将较优个体中包含的公共支路为优势支路. 当 $g_i = 1$ 时, 支路*i*是优势支路, 则有

$$G = \{g_1, g_2, \dots, g_N\}. \quad (12)$$

进化知识采用统计学习方法从样本库中提取获得. 因为具有较高适应度的个体包含优良信息的可能性更大, 所以样本是从种群空间按适应度高低依次选取个体构成. 设样本选取函数中样本接受比例为 k_a , 则选取样本数为 $k_a m$. 设样本库规模为 m_s , 则公共路段满足

$$g_i = \begin{cases} 1, & i = \arg \max_{i=1,2,\dots,N} p_i; \\ 0, & \text{others.} \end{cases} \quad (13)$$

其中优势支路存在概率

$$p_i = \left(\sum_{j=1}^{m_s} c_{ij} \right) / m_s, \quad (14)$$

这里

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } (e_i = 1) \wedge (\text{支路 } i \in x_j(t)); \\ 0, & \text{if } (e_i = 0) \vee (\text{支路 } i \notin x_j(t)). \end{cases} \quad (15)$$

进化知识通过影响个体的修复操作引导种群进化. 修复不可行支路组合时, 根据支路关联度去除关联度最大的支路, 再从可调支路中选取调节支路加入组合, 生成新的支路组合. 新调节支路的选取直接影响算法的搜索效果. 为了提高算法搜索效率, 选取进化知识记录的关联度小的优势支作为可调支路, 在优势支路附近实现局部搜索. 设待修复个体为 $x_i(t)$, Rg_j 为进化知识中支路*j*的关联度, 则有

$$x_{ij}^{R1} = 1, \text{ if } (g_j(t) = 1) \wedge (j = \arg \min_{j=1,2,\dots,N} Rg_j);$$

$$x_{ij}^{R2} = (u_j - l_j) \cdot R_{\text{num}}. \quad (16)$$

4 仿真结果与分析

某矿井的通风网络如图3所示. 它由15条支路, 11个节点构成. 图3中独立回路为 $15 - 11 + 1 = 5$ 个, 风机为1台, 箭头表示支路风流向。

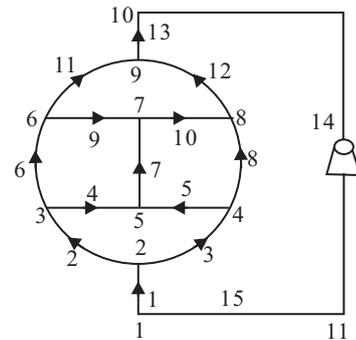


图3 矿井通风网络示例

已知矿井通风网络中各支路自然风量及相关参数如表1所示. 本文算法主要参数取值如表2所示。

表1 通风网络基本参数

分支号	始点	末点	风阻/(kg·m ⁻⁷)	风量/(m ³ ·s ⁻¹)	调节类别
1	1	2	0.0225	95	不许加阻
2	2	3	0.1104	61.619	可加阻
3	2	4	0.3	33.381	可加阻
4	3	5	0.168	31.619	可加阻
5	4	5	3.6	8.381	可加阻
6	3	6	0.15	30.0	可加阻
7	5	7	0.072	40.0	可加阻
8	4	8	1.35	25.0	可加阻
9	6	7	0.225	20.0	可加阻
10	7	8	0.0551	10.0	可加阻
11	6	9	4.5	85.0	可加阻
12	8	9	0.0385	95.0	可加阻
13	9	10	0.0585	95.0	不许加阻
14	10	11	0	95.0	不许加阻
15	11	1	0	95.0	不许加阻

表 2 算法主要参数取值

种群规模	交叉概率	变异概率	接受比例	样本库规模	进化终止代数
50	0.6	0.03	0.2	20	400

采用本文算法得到的最优调阻方案(表 3 中加“*”表示)和无知识引导进化算法、通路法^[2]所得到的调阻方案如表 3 所示. 由表 3 可知, 本文算法不仅可以得到满足控风要求的加阻方案, 而且所得方案的加阻值总和最小, 更加节能且所需调风成本更小. 同时, 知识的引入有效提高了算法的进化效率.

表 3 调阻方案汇总

方案	加阻分支号	加阻值/Pa	加阻总和/Pa	20 次平均进化代数
*1	*2	*277.34	*729.34	112
	*5	*277.32		
	*6	*58.16		
	*11	*116.52		
2	2	277.34	729.34	351
	5	277.32		
	6	58.16		
	11	116.52		
3	5	277.33	787.5	-
	2	277.33		
	9	58.16		
4	11	174.68	1006.67	-
	5	277.33		
	4	277.33		
5	6	335.49	1342.17	-
	11	116.52		
	5	277.33		
	4	277.33		
5	9	335.49	-	-
	11	452.02		
	11	452.02		

5 结 论

针对已有进化算法用于矿井通风网络优化时未能充分利用知识的问题, 借鉴文化算法的双层进化结构, 提出一种融合进化知识和问题特征信息的递阶文化算法. 根据问题特点, 给出进化知识和常识知识两类知识描述, 并根据各类知识的特点分别用于指导修复过程中个体可行性判断和新个体的生成. 仿真分析表明, 该方法能有效利用知识找到所求问题的最优解决方案.

参考文献(References)

[1] 王从陆, 吴超. 矿井通风及其系统可靠性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

(Wang C L, Wu C. Ming ventilation and its system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.)

- [2] 陈开岩. 矿井通风系统优化理论及应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
(Chen K Y. The theory and application of ming ventilation system optimization[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003.)
- [3] 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 Y X, Yang C L. A fast simulated annealing algorithm and its application to global optimal design of ventilation network in mine[J]. J of Wuhan University of Technology, 1998, 20(1): 40-42.)
- [4] 李江, 陈开岩, 林柏泉. 遗传算法在矿井通风网络优化中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(6): 789-793.
(Li J, Chen K Y, Lin B Q. Genetic algorithm for the optimization of mine ventilation network[J]. J of China University of Mining and Technology, 2007, 36(6): 789-793.)
- [5] 黄海燕, 顾幸生, 刘漫丹. 求解约束优化问题的文化算法研究[J]. 自动化学报, 2007, 33(10): 1115-1120.
(Huang H Y, Gu X S, Liu M D. Research on cultural algorithm for solving nonlinear constrained optimization [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(10): 1115-1120.)
- [6] Coelho L D S, Mariani V C. An efficient particle swarm optimization approach based on cultural algorithms applied to mechanical design[C]. IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE, 2006: 1099-1104.
- [7] 郭一楠, 王辉, 程健. 一类自适应混沌文化算法[J]. 控制与决策, 2009, 24(4): 514-519.
(Guo Y N, Wang H, Cheng J. A novel adaptive chaotic cultural algorithm[J]. Control and Decision, 2009, 24(4): 514-519.)
- [8] 柯珂, 张世英. 禁忌-递阶遗传算法研究[J]. 控制与决策, 2001, 16(4): 480-483.
(He K, Zhang S Y. Research on the tabu-hierarchy genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2001, 16(4): 480-483.)