

树状注水管网中高可靠度的拓扑优化方法研究

赵太飞, 张冬冬

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 油田注水管网系统的高效可靠运行在油田生产中是十分重要的。文中采用双网互为备份的方法,运用注水管输理论、图论和最优化理论,以尽可能小的代价来最大程度地提高树状注水管网系统的可靠性。在单管连接和双管连接的情况下,分别对比了有增压设备和无增压设备两种状态下两个网络的可靠度和连接管段的造价。结果表明:双管连接且有增压设备的情况下两个树状网络的可靠度较高。该方法确定了两个树状网络拓扑之间的最优连接方案,保障了整个系统的高效可靠运行。

关键词: 注水管网; 网络拓扑; 双网备份; 可靠度; 管网优化

中图分类号: TP399

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)04-0044-06

Research on method of topology optimization with high reliability in tree water pipe network

ZHAO Taifei, ZHANG Dongdong

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The efficient and reliable operation of oil field water injection pipe network system is very important in the product of oil field. The paper used the method of double network mutual backup and applied water injection pipeline theory, graph and optimization theory so as to improve the reliability of two tree-type networks with as little cost as possible. In the connected case of a single tube and double tube, the paper compared reliability of two networks and the cost of connection section in two states with pressurized equipment and non-pressurized equipment. The results show the reliability of two tree-type networks is higher in the case of double tube connection with pressurized equipment. Finally the optimized connection scheme is achieved between two tree network topologies which ensures the high reliability of system.

Key words: water injection pipe network; network topology; double network mutual backup; reliability; pipe network optimization with high reliability

油田注水管网的拓扑结构按其形状可以分为两种,即树状结构^[1]和环状结构^[2]。树状管网较环状管网具有计算简单、精度高及注水量易于控制的特点,同时树状管网因其投资较少,施工周期较短而备受人们青睐,但其较低的可靠性一直阻碍着它的进一步发展。树状管网一旦发生故障,会对故障节点下游节点有很大的影响,有时下游节点将全部瘫痪,有时只有很少的一部分节点可以正常工作,只有等故障排除才可以完全恢复管网的正常运行,故障期间将会给人民财产造成很大的损失。对于有的树状管网有很高的压力,比如油田注水管网,为了保证生

产的正常运行,工人们一般都是对高压故障管段进行带压检修,破损管段随时有爆管的可能,这对工人的生命构成严重的威胁,但完全关闭阀门进行检修,又造成了严重的经济损失,因此提高系统的整体结构可靠性^[3]十分必要。

目前,一般有3种方法来提高注水网络的可靠性。①在布网时采取给每一个管段都备份^[4]的方法;②在布网时采取给部分重要管段备份的方法^[5];③在布网时用临近网络对其系统进行备份的方法。给整个网络备份因投资巨大虽有理论研究意义但在实际中不会使用;给重要管段备份虽然可以

收稿日期:2014-01-21; 修回日期:2014-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(U1433110); 陕西省教育厅产业化培育项目(2013JC09); 西安市碑林区科技计划项目(GX1302)

作者简介:赵太飞(1978-),男,河南浚县人,博士后,副教授,主要从事网络优化、网络抗毁、紫外光通信网络和无线光通信等方面的研究。

保证易出故障管段的正常运行,在一定程度上提高整体网络的可靠性,但是一旦备份管段上游节点出现故障或其他分支节点出现故障后,还是会对整个网络造成很大影响;用临近网络给注水网络备份的方法可以给出最优化的连接方案,最大程度地保证连接节点的流量供应和系统的高可靠运行。

1 注水管网数学模型

1.1 系统的可靠度^[6-7]

在给定的运行时间段内,节点实际的可利用流量之和与需水量之和的比值即为节点的平均水力可靠度^[8]:

$$R_i = \frac{\sum_{d=1}^{\max} \sum_{t=1}^{24} Q_{it}}{\sum_{d=1}^{\max} \sum_{t=1}^{24} Q_{it}^{req}} \quad (1)$$

式中: R_i 为节点 i 的可靠度; Q_{it} 为节点 i 在第 t 小时的实际可用流量, L/s; Q_{it}^{req} 为节点 i 在第 t 小时的需水量, L/s; $\max$ 为取样的最大个数,即记录节点数据的最大天数。

当 $R_i = 0$ 时,说明在该时间段内节点 i 没有流量供应,此时需要检查节点的故障状态,有可能是阀门关闭,管段断裂或者是压力不足导致的;当 $0 < R_i < 1$ 时,说明节点 i 在该时间段工作在欠正常状态,有可能由流量供应不足引起也有可能是管段出现漏损;当 $R_i = 1$ 时,说明在该时间段节点 i 正常工作。

以节点的均时流量为权重,加权所有节点可靠度的平均值即为系统的平均水力可靠度^[9]:

$$RS = \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i R_i / \sum_{i=1}^n \bar{Q}_i \quad (2)$$

式中: RS 为管网系统的平均可靠度; R_i 为节点 i 的可靠度; $\bar{Q}_i$ 为节点 i 的均时流量, L/s; n 为管网的节点数;

当 $RS = 0$ 时,说明在该时间段内系统没有流量供应,此时需要检查管网的故障状态,有可能是主阀门关闭,主管段断裂或者是泵压力不足导致的;当 $0 < RS < 1$ 时,说明系统在该时间段工作在欠正常状态,有可能由流量供应不足引起也有可能是某些管段出现漏损;当 $RS = 1$ 时,说明在该时间段内系统正常工作。

1.2 节点的压力流量

用达西公式^[10] 计算压损,连接管段的压损为:

$$h_{f实} = \lambda \frac{8lq_{实}^2}{\pi g d^5} \quad (3)$$

式中: $h_{f实}$ 为管段的压损, m; λ 为水头损失系数(无量纲); l 为管段的长度, m; $q_{实}$ 为管段的流量, m³/s; g 为重力加速度, m/s²; d 为管段的内径, mm。

水由 A 节点流向 B 节点,则水压 $p_A > p_B$,同时考虑各个节点的高度差对节点压力的影响,则 A 和 B 两个节点之间的压力关系满足下式:

$$p_A - \rho g h_{f实} + \rho g (z_A - z_B) = p_B \quad (4)$$

式中: p_A 为节点 A 的压力, Pa; $h_{f实}$ 为表管段的压损, m; ρ 为水的密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²; p_B 为节点 B 的压力, Pa; z_A 为节点 A 的地理高度, m; z_B 为节点 B 的地理高度, m。

对于网络中的任意节点,满足质量平衡原理^[11-12] (节点流量平衡),初始流量分配满足吉尔霍夫第一定律,即任意节点的流量之和应等于 0:

$$\sum Q_{ij} + q_i = 0, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: $\sum Q_{ij}$ 为与节点 i 相关联的管段流量的代数和; j 为与节点 i 关联的节点; q_i 为节点 i 的流量; n 为节点的个数。

1.3 管网连接管段的造价

管网结构优化的总造价等于新连接管段的造价之和,连接管段的投资越少越好,而对于两个系统的可靠度提高的越多越好,则造价的目标函数为:

$$C = \min \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_{ij} w_{ij} l_{ij} \right) \quad (6)$$

式中: C 为两个管网的连接造价, 万元; γ_{ij} 为主注水网络节点 i 和备份注水网络节点 j 之间管段的连通系数,当节点 i 和节点 j 之间有连接时, γ_{ij} 等于 1,当节点 i 和节点 j 之间没有连接时, γ_{ij} 等于 0; w_{ij} 为管段的单位长度造价, l_{ij} 为管段的长度, n 为主注水网络的节点个数, m 为备份网络的节点个数。

在实际的管网计算中,用欧式距离来代表管网铺设的实际长度;

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (7)$$

式中: l_{ij} 为管段的长度; (x_i, y_i, z_i) 为节点 i 的三维坐标; (x_j, y_j, z_j) 为节点 j 的三维坐标。

2 双网互为备份最优节点连接方法

双网互为备份是指在两个独立运行且距离较近的树状管网之间,用管段把这两个管网连接起来,当其中一个管网发生故障时,另一个管网利用连接管段为其供应一部分的流量。当连接管段只有一根时称之为单管连接方案,当连接管段有两根时称之为双管连接方案。在整个管网中有许多管段,每个管段

的重要性都不同,用节点的可利用率^[13]和流量利用率来评价不同管段的重要程度,下面定义两个指标的具体含义。

节点的可利用率:在网络中,当某一根管段发生故障后,能正常工作的节点与管网中的节点总数的比值。

$$\eta = \frac{n - n_i}{n}, (i \in (0, n - 1)) \quad (8)$$

式中: η 为网络中节点的可利用率; n_i 为管段 i 出现故障后受影响的节点数; n 为网络中节点的总个数。

流量的可利用率:在网络中,当某一根管段发生故障后,能正常工作的节点的流量和与管网中总的流量和的比值。

$$\beta = \frac{Q_{\text{总}} - Q'_i}{Q_{\text{总}}}, (i \in (0, n - 1)) \quad (9)$$

式中: β 为网络流量的可利用率; Q'_i 为管段 i 出现故障后受影响的节点流量和; $Q_{\text{总}}$ 为网络中所有节点流量的和。

采用双网互为备份最优节点连接方法时,假设有一个主注水网络和一个备份注水网络,这两个网络互为备份,主注水网络也可以当作备份注水网络,备份注水网络也可以当作主注水网络。把水源、注水站、配水间、三通等抽象为节点,把管线抽象为边,实际的管网图就变成了拓扑图,拓扑图中度值为一的节点称为叶子节点。主注水网络和备份注水网络的最佳连接方式的选取流程图如图 1 所示。

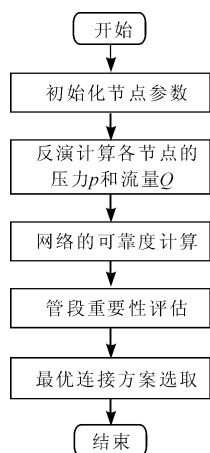


图 1 双网互为备份中最优连接方案的选取流程

主注水网络和备份注水网络的最佳连接方式选取的具体步骤如下所示:

步骤 1: 初始化节点参数。根据叶子节点的压力和流量需求,通过公式(3)、(4)和(5)反演计算^[14],得出主注水网络和备份网络中的所有节点的压力 p 和流量 Q ;

步骤 2: 网络可靠度的计算。根据管网多次运行的数据和步骤 1 计算的节点需求流量代入公式(1)和(2)分别计算两个网络的节点可靠度和系统可靠度;

步骤 3: 管段重要性的评估。利用公式(8)和(9)分别评价两个网络中各个管段在整个网络中的重要性,根据实际需要,设定重要性的临界值(节点的可利用率和流量的可利用率的临界值可以相同也可以不同),把主注水网络中满足条件的管段节点放在集合 S_1 中,把备份注水网络中满足条件的管段节点放在集合 S_2 中;

步骤 4: 最优连接方案的选取

(1) 双网最优节点单管连接方案的选取

① 在无增压设备的情况下,分别从集合 S_1 和集合 S_2 中任取一点,对比备份注水网络节点的压力是否满足主注水网络节点的需求压力,如果不满足,则直接舍弃该方案;如果满足,用公式(1)和(2)重新计算系统在连接管段的情况下的可靠度,并用公式(6)计算连接管段所需要的造价,从计算出的结果中选取两个网络的可靠度之和最大且造价最低的连接方案,就是满足要求的最优方案。② 在有增压设备的情况下,分别从集合 S_1 和集合 S_2 中任取一点,用公式(1)和(2)重新计算两个系统在连接管段的情况下的可靠度,并用公式(6)计算连接管段所需要的造价,从计算出的结果中选取两个网络的可靠度之和最大且造价最低的连接方案,就是满足要求的最优方案^[15-16];

(2) 双网最优节点双管连接方案的选取

① 在无增压设备的情况下,分别从集合 S_1 和集合 S_2 中任取两点,对比备份注水网络节点的压力是否满足主注水网络节点的需求压力,如果不满足,则直接舍弃该方案;如果满足,用公式(1)和(2)重新计算系统在连接管段的情况下的可靠度,并用公式(6)计算连接管段所需要的造价,从计算出的结果中选取两个网络的可靠度之和最大且造价最低的连接方案,就是满足要求的最优方案。② 在有增压设备的情况下,分别从集合 S_1 和集合 S_2 中任取两点,用公式(1)和(2)重新计算两个系统在连接管段的情况下的可靠度,并用公式(6)计算连接管段所需要的造价,从计算出的结果中选取两个网络的可靠度之和最大且造价最低的连接方案,就是满足要求的最优方案^[15-16];

(3) 对比(1)、(2)中选取的最优方案,选择可靠度最高的最优连接方案。

3 实验结果分析

仿真实验选取新疆油田二厂注水管网中的两个树状管网拓扑结构图,如图 2 和 3 所示,主注水网络有 24 个节点,23 条边,0 号节点是水源节点,边上数字为管段的编号;备份注水网络有 41 个节点,40 条边,0 号节点是水源节点,边上数字为管段的编号;管段出故障后,受影响的为管段下游节点,为了尽可能最大程度地增加整个网络的可靠度,要选择最优连接点,用连接管段把两个树状网络连接起来。

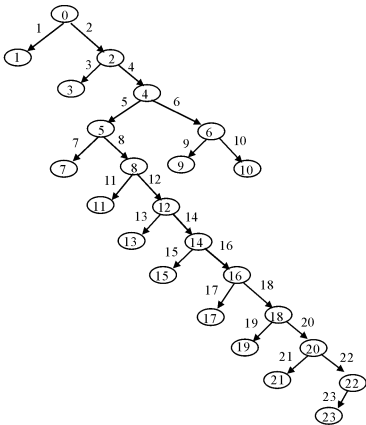


图 2 主注水网络

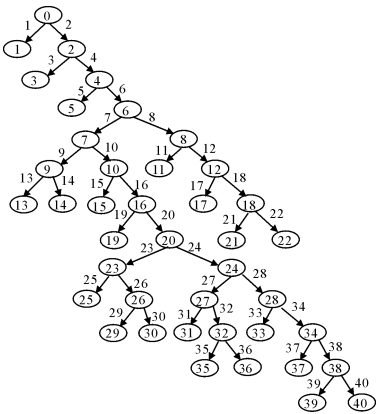


图 3 备份注水网络

从图 4 和 5 中都可以看出,不同管段在整个网络中的重要性是不同的,它们之中的任何一个出现故障后对网络的影响也是不一样的,管段的重要性不仅与管段下面连接的节点数目有关还与节点的流量有着密切的关联。当两个不同管段分别故障后,如果节点的可利用率相等,但流量的可利用率不相等,则这两个管段在整个网络中的重要性是不同的。比如,备份注水网络的 23~26 号管段和 27~32 号管段,管段出故障后,节点的可利用率是相同的,但流量的可利用率是不同的,说明他们对整个网络的

重要性也是不同的。主注水网络的 0~2 号管在整个网络中最为重要(故障后网络中节点的可利用率越小,说明节点越重要;流量的可利用率越小,说明节点越重要),当其发生故障后,网络的节点可利用率最小,流量的可利用率最小,对整个网络的影响也最大,主要是因为它处在树形网络的顶层。

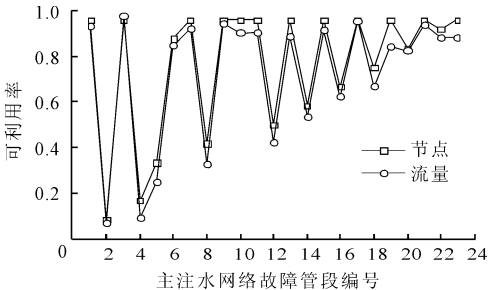


图 4 主注水网络不同管段出故障后对整个网络的影响

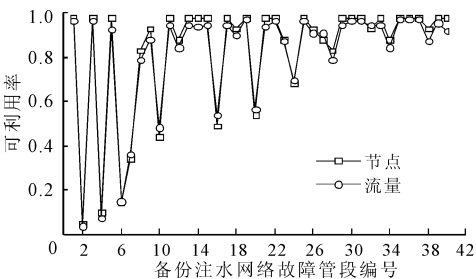


图 5 备份注水网络不同管段出故障后对整个网络的影响

在整个网络拓扑中,取节点的利用率小于 0.5,流量的利用率也小于 0.5 的管段节点,主注水网络满足条件的节点集合为 $S_1 = \{2,4,5,8,12\}$,备份注水网络满足条件的节点的集合为 $S_2 = \{2,4,6,7,10\}$,从集合 S_1 和集合 S_2 中分别任取一个节点,这两个网络节点的连接情况如表 1 所示。

表 1 主注水网络和备份注水网络中满足条件节点的单连接管段

连接管段 编号	连接管段 节点号	连接管段 编号	连接管段 节点号	连接管段 编号	连接管段 节点号	连接管段 编号	连接管段 节点号
1	2-2	6	4-2	11	5-2	16	8-2
2	2-4	7	4-4	12	5-4	17	8-4
3	2-6	8	4-6	13	5-6	18	8-6
4	2-7	9	4-7	14	5-7	19	8-7
5	2-10	10	4-10	15	5-10	20	8-10
						21	12-2
						22	12-4
						23	12-6
						24	12-7
						25	12-10

图 6、7 为主注水网络与备份注水网络连接后单管的可靠度分析,图 8 为单管连接情况下的造价分析,图 9、10 为主注水网络与备份注水网络双管连接后注水网络的可靠度分析图,图 11 为其造价分析图。

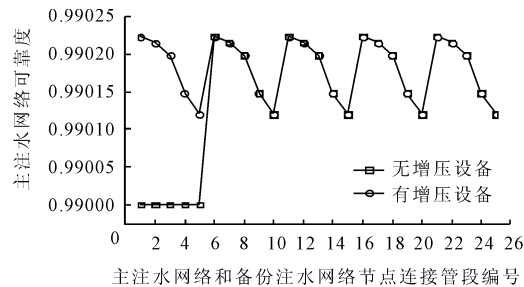


图6 主注水网络与备份注水网络单管连接后主注水网络的可靠度

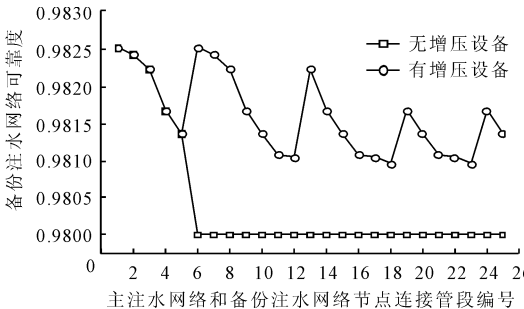


图7 主注水网络与备份注水网络单管连接后备份网络的可靠度

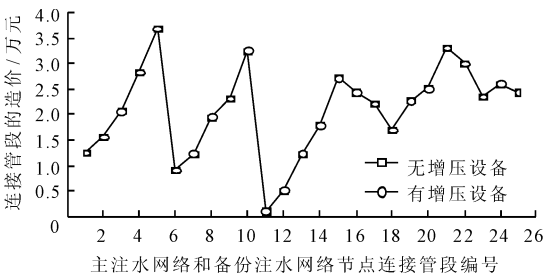


图8 主注水网络与备份注水网络单管连接后连接管段的造价

从集合 S_1 和集合 S_2 中分别任取两个节点,通过选取的节点把两个网络连接起来,把连接情况共分 20 组,从每组中选取造价最低和可靠性提高最多的连接方式,满足条件的连接方式如表 2 所示。

图中的每个管段编号都代表着一种连接方案,各个方案之间是彼此独立的,因此图中的各个点也都是离散的。曲线只是把同一类的点连接在一块,更清晰的对比各个连接方案在有增压设备和无增压设备情况下的差别,并不代表指标的固定变化趋势。

表 2 主注水网络和备份注水网络中满足条件节点的双连接管段

编号	连接管段节点号	编号	连接管段节点号	编号	连接管段节点号	编号	连接管段节点号	编号	连接管段节点号
1	2-2 5-4	9	2-10 4-7	17	4-7 5-2	25	5-6 8-2	33	8-4 12-2
2	2-2 12-4	10	2-10 5-2	18	4-7 8-2	26	5-6 8-4	34	8-4 12-6
3	2-4 5-2	11	4-2 5-4	19	4-10 5-2	27	5-7 8-2	35	8-6 12-2
4	2-4 8-2	12	4-2 8-4	20	4-10 8-2	28	5-7 8-6	36	8-6 12-10
5	2-6 5-2	13	4-4 5-2	21	5-2 8-6	29	5-10 8-2	37	8-7 12-2
6	2-6 8-2	14	4-4 8-2	22	5-2 12-4	30	5-10 8-6	38	8-7 12-6
7	2-7 4-10	15	4-6 5-2	23	5-4 8-6	31	8-2 12-4	39	8-10 12-2
8	2-7 5-2	16	4-6 8-2	24	5-4 12-2	32	8-2 12-6	40	8-10 12-6

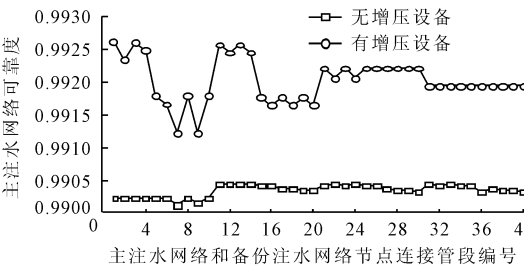


图9 主注水网络与备份注水网络双管连接后主注水网络的可靠度

从单管连接的图 6、7 和双管连接的图 9、10 中可以看出,在没有增压设备的情况之下,因为受节点可供压力的限制,某些节点连接后网络的可靠度并没有变化,即压力不足没有流量供应。有增压设备的情况相比没有增压设备的情况下,主注水网络和备份注水网络的可靠度都有一定的提高,而且有增压设备后,

备份注水网络可靠度的增加幅度比主注水网络可靠度的增加幅度要大一些,因为有了增压设备后,连接点不会再受压力不足的限制,而且主注水网络节点流量的供应能力要高于备份注水网络节点的流量供应能力。

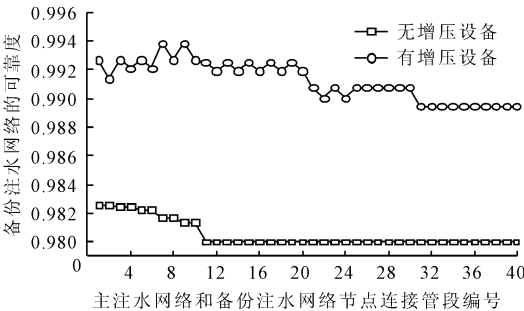


图10 主注水网络与备份注水网络双管连接后备份网络的可靠度

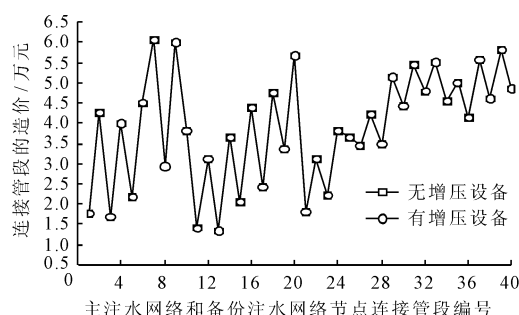


图 11 主注水网络与备份注水网络双管连接后
连接管段的造价

从图 8 和 11 中可以看到,有无增压设备,对连接管段的造价的影响很小,但是这两条曲线均没有考虑增压设备的造价。综合考虑,有增压设备的情况比没有增压设备的情况,整个网络的改造造价要增加 15% 左右。有增压设备的情况下,网络系统的可靠度提高的较多,然而可靠度的提高是以增加投入为代价的。对于单管连接的情况,主注水网络的 5 号节点与备份注水网络的 2 号节点连接,是造价最低的连接方式,但两个网络的可靠度提高的并不是最多的。从图中可以看出,可靠性提高最多的最优的连接方式是主注水网络的 2 号节点与备份注水网络的 2 号节点连接。对于双管连接的情况,主注水网络的 4 号节点和 5 号节点分别与备份注水网络的 4 号节点和 2 号节点连接,是造价最低的连接方式,但两个网络的可靠度提高的并不是最多的。综合分析,可靠性提高最多的最优的连接方式是主注水网络的 2 号节点和 4 号节点分别与备份注水网络的 2 号节点和 4 号节点连接。双管连接的情况与单管连接的情况相比,双管连接的情况两个树状网络的可靠度提高的较多,但连接管段的造价也较高。

4 结 语

(1) 本文通过连接两个并行运行且距离较近的树状网络,使二者互为备份,从而提高网络系统的可靠度。

(2) 文中使用特定的评价指标对网络中管段重要性进行评估,选定重要节点集合,减小搜索空间,使得算法能够较快收敛,文中还给出了最优连接方案的具体步骤以及计算公式。

(3) 在单管连接和双管连接情况下,以新疆油田二厂注水管网为例,比较了有增压设备和没有增压设备系统的可靠度和最优的连接方案,结果表明,

在双管接入有增压设备情况下两个网络的可靠度提高的较多,但这是以增加投资为代价的。

(4) 在投资一定的情况下,考虑了节点高度差的计算结果更加准确,该方法可以给出两个树状网络之间高可靠度的最优连接方案。

参考文献:

- [1] 王桂平,王 衍,任嘉辰. 图论算法理论实现及应用[M]. 北京:北京大学出版社,2011.
- [2] 战 红,杨建军,代晓东. 环状管网优化设计的双重编码混合遗传算法[J]. 石油机械,2008,36(10):27-31.
- [3] 石 航. 基于信息熵的油田注水管网系统的可靠性分析[J]. 内蒙古石油化工,2011(13):45-47.
- [4] 韦 波,张 贺. 自来水管网的可靠性分析与优化设计[J]. 天津科技大学学报,2009,24(2):42-46.
- [5] 张 晋,华 佩,柯华斌,等. 山地城市给水管网系统分析及可靠性研究[J]. 市政技术,2010,28(4):68-70+80.
- [6] Kameda H, Goto H, Kasuga T. System reliability and serviceability of water supply pipelines under seismic environment[C] // Proceedings of the 8th world Conference on Earthquake Engineering, 1984:491-498.
- [7] 马洪伟,周溪孙,孙洪运. 城市交通网络连通可靠度计算研究[J]. 计算机应用研究,2013,30(1):36-38+41.
- [8] Tanyimboh T T, Tabesh M, Burrows R. Appraisal of source head methods for calculating reliability of water distribution networks[J]. Water Resource Plan Manage, 2001, 127(4): 206-213.
- [9] 庄宝玉,赵新华,李 霞. 基于延时模拟的供水管网可靠性分析[J]. 中国给水排水,2009,25(21):105-108.
- [10] 陈涌城,杜玉柱,耿安锋. 输配水管道沿程水头损失计算方法探讨[J]. 给水排水,2009,35(11):109-111.
- [11] 张和烽. 油田注水系统仿真与运行优化研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
- [12] 史义雄. 建立节点连续性方程求解污水管网设计流量[J]. 给水排水,2007,33(4):113-116.
- [13] Zhuang B, Lansey K, Kang D. Reliability/availability analysis of water distribution systems considering adaptive pump operation[C] // World Environmental and Water Resources Congress, 2011:224-233.
- [14] 常玉连,任永良,安东俊,等. 油田供水管网管道内径反演方法研究[J]. 数学的实践与认识,2006,36(6):92-98.
- [15] Su Y C, Mays L W, Duan N, et al. Reliability-based optimization model for water distribution systems[J]. Hydraulic engineering, 1987, 113(12):1539-1556.
- [16] 陈玲俐,李 杰. 城市供水管网系统抗震功能可靠度分析[J]. 工程力学,2004,21(4):45-50.