

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0040

郑霞忠,胡超然,朱炜.面向网络抗毁性的输水网络拓扑结构优化设计[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):177-183,224. ZHENG X Z, HU C R, ZHU W. Topology optimization design for water transportation network based on network invulnerability[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 177-183, 224. (in Chinese)

面向网络抗毁性的输水网络拓扑结构优化设计

郑霞忠^{1,2}, 胡超然^{1,2}, 朱炜^{1,2}

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 安全生产标准化评审中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:为优化输水网络拓扑结构,量化网络抗毁性,建立以网络抗毁性最大化为目标的输水网络拓扑结构优化模型。首先,以输水网络拓扑结构为基础,从节点所处位置的中心程度和可替代程度出发,推求节点结构重要度,并以此表征网络抗毁度。其次,以网络边可连接数及边无交叉性为约束条件,建立以网络抗毁性最大化为目标函数的优化模型。最后,结合某输水网络算例,应用遗传算法求解该模型,寻求最优输水网络拓扑结构。算例计算结果表明:优化后网络中的节点结构重要度数值离散程度减小,网络抗毁性相较优化前得到了很大的提升,说明该模型能够为解决输水网络拓扑结构优化问题提供参考。

关键词:输水网络;网络抗毁性;目标优化模型;遗传算法;拓扑结构优化

中图分类号:TV211 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Topology optimization design for water transportation network based on network invulnerability

ZHENG Xiazhong^{1,2}, HU Chaoran^{1,2}, ZHU Wei^{1,2}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Center of Standardization Evaluation for Production Safety, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to optimize the topology of the water delivery network, this paper quantified the invulnerability of the network and established a topology optimization model for the water network with the objective of maximizing the invulnerability of the network. Firstly, the importance of the node structure was derived from the central degree and the degree of substitutability of the location of the node based on the topology of the water transport network, and then the network invulnerability was characterized. Secondly, the non-crossing of edges in a network as constraints considering the number of connectable edges, and the optimization model with the maximization of network invulnerability was established. Finally, combined with an example of water delivery network, the genetic algorithm was applied to solve the model and the optimal topology of the water delivery network was sought. The calculation results showed that the degree of discreteness of the node structural importance in the network was reduced and the network invulnerability was greatly improved compared to without optimization. This indicated that the model could provide a reference for solving the problem of topology optimization of the water delivery network.

Key words: water delivery network; the network invulnerability; target optimization model; genetic algorithm; topology optimization

收稿日期:2019-05-07 修回日期:2019-09-20 网络出版时间:2019-09-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190927.1348.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(51878385)

作者简介:郑霞忠(1963—)男,湖北鄂州人,教授,博士,主要从事水利安全管理方面研究。E-mail: zhengxz@126.com

通信作者:胡超然(1996—)女,湖北宜昌人,主要从事水利安全管理方面研究。E-mail: 2362717050@qq.com

随着我国城镇化进程的加快,水资源需求量逐步上升,通过修建输水工程解决城市水资源分配问题是一种必然的发展趋势^[1]。输水网络具有管线长、输水建筑物多、拓扑结构复杂等特点,在突发事件破坏作用下容易产生级联失效,从而引发大面积缺水少水的状况^[2],影响网络的整体性能并造成经济损失。因此,开展输水网络拓扑结构优化研究,对于保障输水网络安全稳定运行具有重要意义。

输水网络的稳定性和可靠性是保证人民生活质量和城市机能运转的不可或缺因素^[2]。国内外学者已基于可靠性、鲁棒性等输水网络安全性指标,对输水网络优化问题进行了一系列研究。Jung^[3]等提出了基于图论的两种新的拓扑结构可靠性定义,运用WDS多目标决策模型对输水系统进行优化设计;何忠华^[4]等以剩余能量熵作为可靠性度量指标,建立以剩余能量熵最大化、年费用最小化为设计目标的多目标优化模型;曾文^[5]等针对管线对偶图模型提出可靠性分析方法,用于指导供水网络的设计和运维;伍悦滨^[7]等基于信息熵提出路径熵的概念,以路径最大熵表征系统潜在的最大可靠性,实现对输水网络拓扑结构的合理优化;Kang^[6]将鲁棒性引入输水系统(WDSs)设计中,建立机会约束模型对输水网络进行优化设计;张世泽^[8]等基于安全性需要设置连通管,以输水网络费用作为目标函数,通过改进Dijkstra算法优化网络拓扑结构,然后考虑可靠性目标和水力平衡约束,针对管径组合通过遗传算法寻优。

上述研究通过不同指标对输水网络安全稳定性进行评价,并用于输水网络的优化设计。但在优化过程中未综合考虑节点重要性及网络拓扑结构边界条件限制对输水系统持续稳定运行能力的影响。在输水系统中,输水管线形成纵横交错的树状网络,易造成管线交叉,使级联失效效应对网络造成的影响更大,导致网络抗毁性降低。鉴于此,本文以输水建筑物为节点构建输水网络拓扑结构,考虑输水网络节点重要性对网络抵抗打击能力的影响,量化网络抗毁性,以网络边无交叉性和边可连接数为约束条件,建立使输水网络抗毁性最大化的目标优化模型,并通过遗传算法确定输水网络最优拓扑结构方案,以期为输水系统管道或渠道优化布置提供参考。

1 输水网络拓扑结构优化指标分析

1.1 经济性分析

输水系统的成本是输水系统设计的首要问题。

本文基于输水网络拓扑结构优化模型应满足的边界条件考虑输水系统经济性指标。《室外给水设计规范》(GB 50013—2016)7.3.6条规定,给水管道与其他管道交叉时,需采用钢管或钢管套,钢管套伸出交叉管的长度,每端不得小于3 m,两端采用防水材料封闭。因此对于输水系统,工程建设输水管道或渠道应尽量避免交叉布置,可节约建造成本,减少建造技术难题,降低级联失效对输水网络的影响。同时,因地形及管线限制,输水网络中每个节点仅能与其相邻节点相连,以避免由于管线长度增加及技术难题而造成输水系统建造成本增加,在满足拓扑结构边界条件的同时尽可能满足输水网络经济性指标。

为简化优化计算过程,本文将输水系统中管线设置为统一管径,主要考虑网络抗毁性对输水网络优化设计的影响。

1.2 抗毁性分析

输水系统建造技术的进步有效降低了系统成本,但人口增加和水资源时空分布不均等问题,促使输水系统发展成为覆盖大面积领土的输水网络^[9]。输水系统作为一种跨流域关键基础设施,其稳定性和可靠性对于保证水资源供需以及输水系统持续稳定运行至关重要^[6]。输水网络已经发展成具有数千条分支和相互连接线路的复杂系统,一旦某个关键输水网络节点失效,将造成相当大的损失。因此,有必要从输水网络节点角度出发,研究节点结构重要性对网络抗毁性的影响。

2 抗毁性度量

结构失效发生在关键节点会对输水网络的整体结构性能造成更加不利的影 响。本文从节点在输水网络中所处位置和连接能力两个方面刻画节点结构重要性,找出关键节点,分析输水网络抗毁性。

2.1 节点结构重要性度量

不同重要程度的节点失效后对输水网络抗毁性产生的不同影响被称为节点结构重要性^[14],由于节点在输水网络拓扑结构中位置和连接能力的差异性,其结构重要性可从网络中心程度和可替代程度两方面来刻画。

2.1.1 输水节点中心度

节点在网络中的位置是描述节点重要性的一个关键因素。如果一个节点处于网络的核心位置,即使遭受的攻击程度很小,它对系统的影响也会较大。此处引入输水节点中心度,表示节点处于输水网络中心位置的程度。

传统接近中心性通过计算节点与网络中其他所有节点的距离的平均值来表示节点位于中心位置的程度,但其仅能用于连通网络,有一定局限性。而残余接近中心性在改进接近中心性的基础上,表示删除节点后对网络结构产生的影响,应用的范围相对于传统接近中心性从连通图扩展到非连通图,更能够适用于不同类型的输水网络。

2.1.1.1 节点改进接近中心性

改进接近中心性分母取以 2 为底的指数,使接近中心性更易计算和扩展,提高了较短路径对输水网络的影响。假设输水网络有 n 个节点,对于任意两点 i, j , 节点 i 的改进接近中心性可表示为

$$C(i) = \sum_{j \neq i} \frac{1}{2^{d(i,j)}} \quad (1)$$

式中: $d(i, j)$ 是指任意两点 i, j 之间的距离,且 $i \neq j$ 。

2.1.1.2 网络改进接近中心性

网络改进接近中心性即为输水网络中所有节点的改进接近中心性之和,公式为

$$C = \sum_i C(i) \quad (2)$$

2.1.1.3 网络残余接近中心性

残余接近中心性是指输水系统某个节点移除后的网络改进接近中心性,用来衡量该节点移除后对网络带来的影响,删除节点 i 后的网络残余接近中心性可表示为

$$C_i = \sum_k \sum_{j \neq k} \frac{1}{2^{d_i(k,j)}} \quad (3)$$

式中: $d_i(k, j)$ 表示输水网络中删除节点 i (节点 i 失效) 后节点 j 与剩下所有节点 k 的距离。残余接近中心性认为若一个节点的删除使得网络变得更脆弱,该节点就越重要。当节点 i 删除后,网络残余接近中心性越大,说明它处于中心位置程度越高,该节点就越关键。

2.1.1.4 输水节点中心度

通过相对网络残余接近中心性来表示被删除节点 i 的中心度,公式为

$$Z(i) = \frac{C_i}{C} \quad (4)$$

式中: C 为未删除节点之前原始网络的改进接近中心性; C_i 为删除节点 i 后网络残余接近中心性。 C_i 越接近 C , $Z(i)$ 越接近于 1, 表明网络中节点 i 的中心度越高。

2.1.2 输水节点容毁度

当系统组件发生故障时,具有高连接性的复杂输水网络中可能具有可替代的输水路径。因此,引

入节点的容毁性,表示当节点被破坏时,该节点的路径可以被其他并行节点所在路径替代的可能性,若可替代程度较高,则节点结构重要性减小。

2.1.2.1 节点可替代路线

输水系统中某个建筑物(即节点) i 处于中心位置,其上级任意一个节点为 $g(g=1, 2, \dots, p)$, 下级任意一个节点为 $h(h=1, 2, \dots, q)$, 通过该输水建筑物的路径总数为 pq 条。若节点毁坏,那么 p 中节点和 q 中节点组成的路径将全部毁坏,若节点 i 存在并行节点,则其必有可替代路线。设节点 j 和节点 h 之间可替代路线总和为 $t(j, h)$, 则节点 i 的总可替代路线数为

$$A_i = \sum_{(g,h)=(1,1)}^{(p,q)} t(g, h) \quad (1 \leq g \leq p, 1 \leq h \leq q) \quad (5)$$

A_i 越大,说明在整个输水网络中节点 i 被并行节点替代的可能性就越大。

2.1.2.2 输水节点容毁度

在求解每个节点的可替代路线的基础上,定义节点容毁度

$$R(i) = 1 - \frac{1}{A_i + 1} \quad (6)$$

节点的容毁度越低,节点的可替代性减小,说明节点结构重要性增加。若上级节点与下级节点之间只有唯一路径,节点容毁度为 0, 则说明该节点非常重要。

2.1.3 节点结构重要度

对于任意节点,其结构重要度是节点中心度和节点容毁度的耦合表达为

$$S(i) = Z(i)(1 - R(i)) \quad (7)$$

$S(i)$ 越大,表示节点在输水网络中所处的位置越关键,该节点的结构重要性越高。

2.2 输水系统网络抗毁性表征

输水网络节点结构重要度越大,对网络抗毁性的影响更显著。节点结构重要度的平均水平能够反映输水网络整体抗毁性情况,其均值相同但分布不同仍会导致网络抗毁性差异明显,此时级联失效对网络的影响较大。因此,在评估输水网络整体抗毁性时应考虑节点结构重要度的离散程度,离散程度越高,输水网络拓扑结构越不稳定,抗毁性越低,故输水系统网络抗毁性表征为

$$D(S) = \frac{1}{n-1} [(S(1) - \bar{S})^2 + (S(2) - \bar{S})^2 + \dots + (S(n) - \bar{S})^2] \quad (8)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S(i) \quad (9)$$

$$I = \frac{1}{D(S)} \quad (10)$$

$D(S)$ 为节点结构重要度均方差, 表示输水网络中节点结构重要度离散程度, 网络抗毁度表示为 I 。 I 越大, 说明网络抗毁性越高。

3 输水网络拓扑结构优化模型

输水系统的安全可靠是保证输水效益的重要基础^[11]。在纵横交错的输水网络中管道或渠道交叉现象时有发生, 此时级联失效对输水网络结构的影响更甚, 使得网络抗毁性降低, 同时考虑实际环境中节点仅能与附近节点相连接。因此, 本文以输水网络抗毁性最大化为目标, 考虑拓扑结构中边根数及边交叉约束, 设计输水网络拓扑结构优化模型。

3.1 目标函数

以输水网络抗毁度最大化为目标, 提升输水系统遭受打击后恢复工作水平的能力, 建立目标函数为

$$\max F = \max I \quad (11)$$

3.2 约束条件

3.2.1 边根数约束

输水系统中水源和目的地输水长度可达数百公里, 输水网络依附之处地质地形环境不尽相同。由于自然物理环境的限制, 节点在网络中的可行连接节点数为有限个, 且仅能与其附近节点相连接, 则节点 i 可行连接节点数 M_i 有以下范围

$$0 < M_i < m_{i, \max} \quad (12)$$

式中: $m_{i, \max}$ 表示节点最大可行连接节点数, 即任意节点与其附近节点的最大连接数。

3.2.2 边交叉约束

当输水网络各边交叉时, 会进一步增加级联失效对输水网络的影响。见图 1(a), 若交叉节点遭到破坏, 则节点 6 失效, 节点 4 负载减小, 且对节点 7 负载影响较大, 导致节点 8 无法满足其流量需求, 对整个网络造成的影响较大; 在无边交叉的图 1(b) 中, 突发事件导致节点 6 失效, 节点 4 能正常工作, 节点 7 负载减少程度较小, 对输水网络造成的影响较小。故避免管道或渠道交叉对增强输水网络抗打击能力具有重要意义。

由于网络系统中的每个节点的位置都可用坐标表示, 避免交叉问题可以转化为坐标平面上的任意两组点连线交点不能同时落在两条线段上的条件。假设在输水网络中任取四个点 $A(x_A, y_A), B(x_B, y_B), C(x_C, y_C), D(x_D, y_D)$

$$G = \{E(x', y') \mid x_A < x' < x_B, y_A < y' < y_B, x_C < x' < x_D, y_C < y' < y_D\} \quad (13)$$

$$P = \bar{G} \quad (14)$$

式中: $E(x', y')$ 是直线 AB 和直线 CD 的交点; G 表示同时位于线段 AB 和线段 CD 上的交点 E 集合, 则 \bar{G} 表示没有同时落在两条线段的交点 E 集合, 在这种情况下, 线段 AB 和线段 CD 没有交叉。

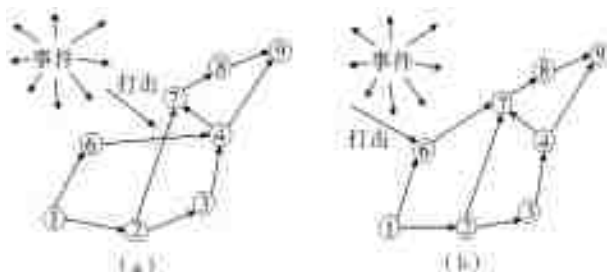


图 1 边交叉对比

Fig. 1 Edge cross contrast chart

3.3 模型求解

传统优化算法过程计算复杂, 且仅能求出局部最优解。而遗传算法作为一种全局性概率随机搜索算法, 在求解非线性规划问题过程中具有覆盖面大, 利于全局择优、自组织、自适应等优点, 所以采用遗传算法解决输水网络拓扑结构优化问题更为合适。应用遗传算法进行输水网络拓扑结构优化算法设计主要步骤如下^[10]。

(1) 节点及管段编号: 在代表输水系统的网络拓扑结构图中, 两个节点间的线段称为一个管段, 自进水口起的每一个管段及代表输水建筑物的节点依次编号为 $1, 2, \dots, n$ 。

(2) 将工程算例中管径及管道长度等参数代入式(7)–(10)中表征网络抗毁性。

(3) 确定合适的罚函数因子, 建立适应度函数, 构造罚函数处理约束条件式(12)–(14), 将约束优化问题转化为无约束优化问题。

(4) 根据工程算例确定遗传算法中各基本参数, 创建初始群体。

(5) 计算遗传群体中各个个体的适应度函数值并将罚函数项加到适应度函数值上。

(6) 收敛 k 次后判断(5)结果是否满足收敛准则 $\|S^k - S^{k-1}\| < \varphi, \varphi$ 为终止误差 ($0 < \varphi < 1$)。

(7) 若不满足收敛准则, 则对初始群体执行选择、交叉和变异操作, 以迭代产生下一代遗传群体; 若满足收敛准则, 则算法结束, 输出最优解。

(8) 重复(5)(6)(7)过程, 直到多次迭代后满足收敛准则或算法终止准则, 进化过程中所得到的具有最大适应度个体作为最优解输出, 作为最优网络

拓扑结构方案。

4 案例分析

4.1 工程概况

现有一输水网络,将闸阀、调节井、泵站、通气井、水库等设施作为节点,同时将渠道、输水管道等设施作为边,该输水网络中有 17 个输水节点,20 条输水管道或渠道,其中节点 1 为入水口,见图 2。为简便计算,网络抗毁性评价的基本假设是:当故障发生时,将故障节点从网络中移除,并关闭其连接的边,且故障节点所在的区域与网络的其他部分是隔离的。

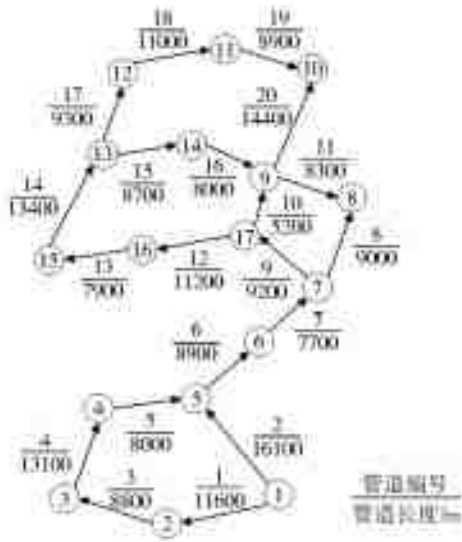


图 2 优化前原始网络拓扑结构

Fig. 2 Original network topology diagram before optimization

由式(7)一(10)可求得各节点结构重要度见图 3,其中网络节点结构重要度均方差为 0.035 3,原始输水网络抗毁度为 28.334 8。

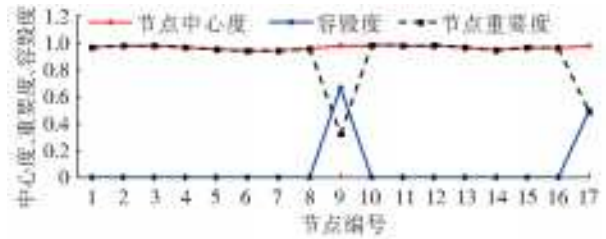


图 3 优化前节点参数变化

Fig. 3 Node parameter variation diagram before optimization

由图 3 可知,优化前输水网络中节点 9 的节点中心度较高,但由于其容毁度较高,说明并行节点可替代程度较高,故节点 9 的重要度降低。从图 3 中可以看出网络中节点重要度数值整体波动较大,其中节点 12 的重要度最大,故视作关键节点。

4.2 网络拓扑结构优化结果分析

根据上述算法步骤运用 MATLAB 编程,通过遗传算法进行计算,确定罚函数对约束条件进行处理,进行多次迭代后,达到算法终止准则,从最终遗传群体中选择最大适应度函数值的个体作为最优个体。此处目标函数值为非负数,且以求函数最大值为优化目标,故可将目标函数值作为个体的适应度。

经计算,最终遗传群体有四个个体,计算其网络抗毁度,分别为 63.827 6, 82.340 1, 87.128 0, 41.481 8,抗毁度最大的个体即为最优拓扑结构方案,其参数见表 1。

表 1 优化后网络节点参数

Tab. 1 Optimized network node parameters

节点编号	节点中心度	容毁度	节点重要度	节点编号	节点中心度	容毁度	节点重要度
1	0.966 8	0.500 0	0.483 4	10	0.979 1	0.750 0	0.244 8
2	0.967 7	0.500 0	0.483 9	11	0.972 7	0.666 7	0.324 2
3	0.978 8	0.500 0	0.489 4	12	0.981 5	0.666 7	0.327 2
4	0.962 6	0.666 7	0.320 9	13	0.963 5	0.500 0	0.481 8
5	0.980 0	0.500 0	0.490 0	14	0.971 1	0.800 0	0.194 2
6	0.946 2	0.500 0	0.473 1	15	0.959 1	0.666 7	0.319 7
7	0.964 1	0.800 0	0.192 8	16	0.965 9	0.666 7	0.321 9
8	0.954 4	0.666 7	0.318 1	17	0.975 6	0.666 7	0.325 2
9	0.960 9	0.500 0	0.480 5				

优化后的节点结构重要度变化趋势见图 4,优化后的网络抗毁度为 87.128 0,其中网络节点结构重要度均方差为 0.011 5。

将优化输水网络拓扑结构前后节点重要度变化对比见图 5。优化前的网络拓扑结构图中,节点结构重要

度均方差为 0.035 3,优化后网络节点结构重要度均方差为 0.011 5,相比优化前减少了 67.48%。由图 5 可知,优化后的节点结构重要度数值分布较均匀,没有出现重要度极大或极小的节点,故优化后的网络较稳定,构级联失效对网络结的影响减小,网络抗毁度增加。

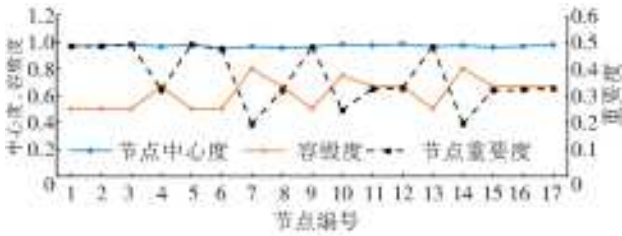


图 4 优化后节点参数变化

Fig. 4 Node parameter variation diagram after optimization

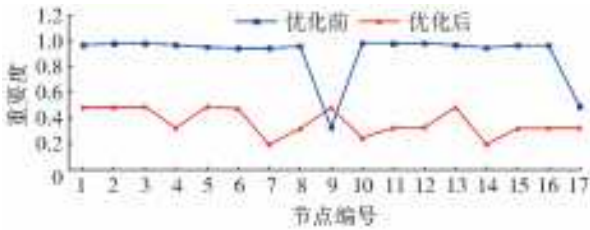


图 5 节点重要度变化趋势

Fig. 5 Change trend of node importance

优化后输水网络中管道或渠道由 20 条增加到 28 条,总长度增加了 125 km,由于模型中约束条件的限制,优化图中每个节点未与其他所有节点相连接,故输水网络成本没有产生大幅度的增加。同时,由优化计算结果可知,优化前的拓扑结构(图 6)中网络抗毁度为 28.334 8,优化后的网络抗毁度为 87.128 0,使输水网络抵御风险能力得到了很大的提升。优化前网络图中节点 7 与节点 9 之间无可替代路径,一旦节点 7 遭到破坏,将导致节点 9 甚至整个输水网络的失效;优化后节点 7 和节点 5 至下一级节点均有多条可替代路径,容毁度增加,提高了输水网络抵抗打击的能力。

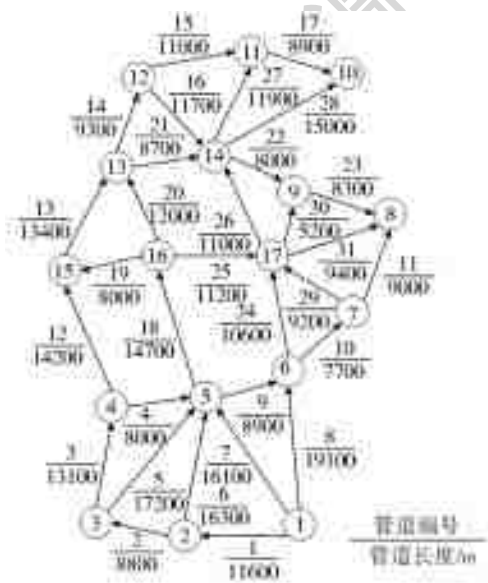


图 6 优化后网络拓扑结构

Fig. 6 Network topology diagram after optimization

分析节点结构重要度可知,无论优化前还是优化后,节点 5、节点 11 和节点 13 的节点重要度均较

高,说明这几个节点一旦发生破坏,将对输水网络造成较大的影响。可考虑对这些节点实施重点监控,在发生突发事件时,应重点排查这几个节点以尽快采取措施减少损失。

5 结论

(1)基于输水系统构建拓扑结构网络图,以节点结构重要度为基础度量网络抗毁性。以网络抗毁性最大化为目标函数,考虑网络拓扑结构边界条件限制,建立输水网络拓扑结构优化模型。

(2)通过工程实例表明,优化后的输水网络拓扑图中节点结构重要度分布较均匀,网络中没有极其重要的节点,网络抗毁性相较原始网络有一定幅度的提升,验证了该优化模型的可行性和有效性。

(3)针对输水系统,本文仅从节点结构重要度分布与网络拓扑结构边界条件对输水网络稳定运行的影响角度出发,优化输水网络拓扑结构。由于输水系统的特殊性,还需考虑输水网络成本^[16]、保证输水节点流量需求等因素进行定量分析,是下一步的研究方向。

参考文献(References):

[1] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 424-435. (YANG K L. Review and frontier scientific issues of hydraulic control for long distance water diversion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 424-435. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150824.

[2] 双晴. 基于级联失效的城市供水管网系统可靠性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (SHUANG Q. System reliability of urban water distribution networks under cascading failures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))

[3] JUNG D, KIM J H, et al. Water distribution system design to minimize costs and maximize topological and hydraulic reliability [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2018, 144. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000975.

[4] 何忠华, 袁一星. 基于剩余能量熵的供水管网可靠性优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(7): 1188-1194. (HE Z H, YUAN Y X. Reliability optimization design of water distribution system based on surplus energy entropy [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(7): 1188-1194. (in Chinese)) DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2014.07.007.

[5] 曾文, 时圣磊, 丁晶晶. 基于管线对偶图模型的供水管

- 网可靠性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 56-63. (CENG W, SHI S L, DING J J. Reliability analysis for water supply networks based on pipeline dual graph model[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 56-63. (in Chinese)) DOI: 10. 11918/j. issn. 0367-6234. 201707192.
- [6] JUNG D, KANG D, KIM J H, et al. Robustness-based design of water distribution systems [J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2014, 140(11). DOI: 10. 1061/(ASCE)WR. 1943-5452. 0000421.
- [7] 伍悦滨, 王芳, 田海. 基于信息熵的给水管网系统可靠性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007(2): 251-254. (WU Y B, WANG F, TIAN H. Entropy-based reliability analysis in water distribution systems[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007(2): 251-254. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; HEBX. 0. 2007-02-019.
- [8] 张世泽, 袁一星, 李玉华. 城市供水管网优化设计两步法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 111-117. (ZHANG S Z, YUAN Y X, LI Y H. A two-step method for optimal design of water distribution system[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 111-117. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; HEBX. 0. 2009-04-023.
- [9] 崔巍, 杨开林, 谢省宗, 等. 长距离调水工程虚拟仿真系统开发研究[J]. 水利水电技术, 2008(3): 70-74. (CUI W, YANG K L, XIE S Z, et al. Virtual simulation system for long distance water transfer project[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008(3): 70-74. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2008. 03. 021.
- [10] 余嵘, 严程, 逯佩宁. 自适应罚函数遗传算法对给水管网优化的研究[J]. 给水排水, 2016, 52(4): 136-140. (YU R, YAN C, LU P N. Research on optimization of water supply network based on adaptive penalty function genetic algorithm[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52(4): 136-140. (in Chinese)) DOI: 10. 13789/j. cnki. wwel1964. 2016. 0137.
- [11] 陈述, 汪飞, 李娇娇, 等. 基于路径熵的长距离输水系统脆弱性研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(9): 23-27. (CHEN S, WANG F, LI J J, et al. Path entropy-based study on vulnerability of long-distance water conveyance system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(9): 23-27. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2016. 09. 005.
- [12] DANGALCHEV C. Residual closeness in networks[J]. Physica A, 2006, 365(2): 556-564. DOI: 10. 1016/j. physa. 2005. 12. 020.
- [13] SEIGOLLAHI-AGHMIUNI S, HADDAD O B, Marin O M A. Water distribution network risk analysis under simultaneous consumption and roughness uncertainties[J]. Water Resources Management, 2013, 27(7): 2595-2610. DOI: 10. 1007/s11269-013-0305-4.
- [14] 郑霞忠, 汪飞, 陈述. 基于节点的长距离输水系统网络结构抗毁性测度[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 31-35. (ZHENG X Z, WANG F, CHEN S. Node-based estimation of network structural invulnerability of long distance water conveyance system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 31-35. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2016. 12. 007.
- [15] KANSAL M L, KUMAR A, SHARMA P B. Reliability analysis of water distribution systems under uncertainty[J]. Reliability Engineering & System Safety, 1995, 50(1): 51-59.
- [16] 乔俊飞, 魏静, 韩红桂. 基于改进 NSGA2 算法的给水管网多目标优化设计[J]. 控制工程, 2016, 23(12): 1861-1866. (QIAO J F, WEI J, HAN H G. Multi-objective optimization of water distribution system based on an improved NSGA2 algorithm[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(12): 1861-1866. (in Chinese)) DOI: 10. 14107/j. cnki. kzgc. 160327.
- [17] BARLOW E, TANYIMBOH T T. Multiobjective memetic algorithm applied to the optimisation of water distribution systems [J]. Water Resources Management, 2014, 28(8): 2229-2242. DOI: 10. 1007/s11269-014-0608-0.
- [18] SULTANOVA N, SULTANOVA N, SAVIC D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system operation[M]. Elsevier Science Publishers B. V. 2017. DOI: 10. 1016/j. envsoft. 2017. 02. 009.
- [19] LI M, LIU S, ZHANG L, et al. Non-dominated sorting genetic algorithms-II based on multi-objective optimization model in the water distribution system[J]. Procedia Engineering, 2012, 37(4): 309-313. DOI: 10. 1016/j. proeng. 2012. 04. 245.
- [20] SHUANG Q, ZHANG M, YUAN Y. Node vulnerability of water distribution networks under cascading failures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 124(1): 132-141. DOI: 10. 1016/j. ress. 2013. 12. 002.
- [21] 苏臻, 高超, 李向华. 节点中心性对复杂网络传播模式的影响分析[J]. 物理学报, 2017, 66(12): 12-37. (SU Z, GAO C, LI X H. Analysis of the effect of node centrality on diffusion mode in complex networks[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(12): 12-37. (in Chinese)) DOI: 10. 7498/aps. 66. 120201.

(下转第 224 页)

- [14] 华景生, 万兆惠. 粘性土及粘性土夹沙的起动规律研究[J]. 水科学进展, 1992(4): 4. (HUA J S, WAN Z H. Incipient motion law of cohesive soil and the mixture of cohesive sediment and coarse particle[J]. Advances in Water Science, 1992(4): 4. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 1992. 04. 005.
- [15] 洪大林, 缪国斌, 邓东升, 等. 粘性原状土起动切应力与物理力学指标的关系[J]. 水科学进展, 2006(6): 2. (HONG D L, MIAO G B, DENG D S, et al. Relation of starting shear stress and physical and mechanical indexes of cohesive undisturbed soil[J]. Advances in Water Science, 2006(6): 2. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2006. 06. 003.
- [16] 宗全利, 夏军强, 张翼, 等. 荆江段河岸粘性土体抗冲特性试验[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 567-574. (ZONG Q L, XIA J Q, ZHANG Y, et al. Experimental study on scouring characteristics of cohesive bank soil in the Jingjiang reach[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 567-574. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2014. 04. 014.
- [17] SMERDON E T, BEASLEY R P. Critical tractive forces in cohesive soils[J]. Agricultural Engineering, 1961, 42(1): 26-29.
- [18] THOMAN R W, NIEZGODA S L. Determining erodibility, critical shear stress, and allowable discharge estimates for cohesive channels: Case study in the powder river basin of Wyoming[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 134(12): 1677-1687. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1677)
- [19] 王军. 淤积固结条件下粘性泥沙起动冲刷问题初步研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2007. (WANG J. Study on initiate and scour of cohesive sediment after deposition and consolidation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2007. (in Chinese))
- [20] 夏军强. 长江荆江段崩岸机理及其数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2015. (XIA J Q. Mechanism and numerical simulation of bank collapse in Jingjiang section of the Yangtze River[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese))
- [21] PARTHENIADES E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1965, 91(1): 105-139.
- [22] HANSON G J, SIMON A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(1): 23-38. DOI: 10. 1002/hyp. 149.

.....

(上接第 183 页)

- [22] 潘永昌, 王军. 基于蚁群算法的输水树状管网优化布置[J]. 节水灌溉, 2007(8): 40-42. (PAN Y C, WANG J. The optimal layout of water delivery tree network based on ant colony algorithm [J]. Water Saving Irrigation, 2007(8): 40-42. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4929. 2007. 08. 014.
- [23] KADU M S, GUPTA R, BHAVE P R. Optimal design of water networks using a modified genetic algorithm with reduction in search space[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2008, 134(2): 147-160. DOI: 10. 1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:2(147).
- [24] YAZDANI A, JEFFREY P. Applying network theory to quantify the redundancy and structural robustness of water distribution systems[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2012, 138(2): 153-161. DOI: 10. 1061/(ASCE)WR. 1943-5452. 0000159.
- [25] PANDEY S, MATHUR Y P. Optimization of water distribution network using particle swarm optimization [J]. Neural Computation, 2013, 8(12): 80-91. DOI: 10. 1162/NECO_a_00494.
- [26] YAZDANI A, JEFFREY P. Complex network analysis of water distribution systems[J]. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, 2011, 21(1): 016111. DOI: 10. 1063/1. 3540339.