

郑霞忠, 汪飞, 陈述, 等. 序贯攻击下长距离输水网络结构抗毁性演化研究[J]. 灾害学, 2017, 32(4): 1-5, 10. [ZHENG Xiazhong, WANG Fei, CHEN Shu, et al. Structure Survivability Evolution Analysis of Long Distance Water Conveyance Network under Sequential Attack[J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(4): 1-5, 10. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.001.]

序贯攻击下长距离输水网络结构抗毁性演化研究^{*}

郑霞忠^{1,2}, 汪飞^{1,2}, 陈述^{1,2}, 何君玫^{1,2}

(1. 湖北省水电工程施工与管理重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为探究蓄意攻击下长距离输水网络结构抗毁性能演化趋势, 综合运用图论, 复杂网络理论, 确定序贯攻击路径, 构建抗毁性演化仿真模型。根据长距离输水系统特点, 比较节点攻击和边攻击特点, 选定攻击方式; 引入节点聚类系数, 厘定节点介数, 表达节点破坏量, 作为序贯攻击目标节点选择标准; 依据节点攻击下系统输水效率, 定义输水网络结构抗毁度及节点关键程度; 最后, 进行实例仿真, 结果表明: 序贯攻击路径由网络中间位置向边缘转移, 网络抗毁性在序贯攻击下逐渐降低, 直至网络瘫痪; 整个输水网络关键节点为 65、39、50、38, 对结构抗毁性影响最大, 应重点监控并优化; 该方法可为分析长距离输水系统设计和应急资源布控提供理论指导。

关键词: 序贯攻击; 长距离输水; 复杂网络; 输水建筑物; 抗毁性演化

中图分类号: X915.5; X43; TV67 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2017)04-0001-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.04.001

区域水资源紧缺问题日趋严峻, 已成为我国部分城市经济发展的制约因素^[1]。建设长距离输水系统, 是解决区域性缺水的重要工程举措^[2]。长距离输水系统因水流流向单一、网络拓扑结构复杂, 一旦遭受破坏, 恢复难度大, 严重影响一区人民的生命安全和经济发展^[3], 这使其成为武力打击对象的可能性增加。因此, 在恐怖主义蔓延的背景下, 研究长距离输水系统在蓄意攻击下抗毁性的演化规律, 对于建立输水网络保障体系和分配突发事件应急资源具有重要意义。

输水系统的安全可靠是保证输水效益的重要基础, 国内外学者对此进行了一系列研究。余建星等^[4]分析了冰力作用下穿越河流输水管道的受力情况, 建立了输水管道在冰荷载作用下的安全裕度方程, 提出了冰力作用下输水管线可靠性的计算方法; 冯平等^[5]考虑沿途众多河系洪水对长距离输水交叉建筑物冲刷的影响, 提出了串联系统引水工程交叉建筑物的综合水毁风险计算方法; Cassaro 等^[6]在考虑自然灾害攻击长距离输水系统的条件下, 建立了输水系统风险决策支持系统; Jack 等^[7]系统分析长距离输水突发事件类型, 制定了应急响应计划, 保证输水安全; 胡蕾等^[8]采用非线性时程动力分析方法, 研究了大跨度明钢管的地震响应, 确定了行波

效应的波速区段; 郑霞忠等^[9]为量化长距离输水系统网络结构抗毁性, 根据输水系统拓扑网络特征, 分析输水节点结构重要性与网络结构抗毁性的耦联关系, 分析节点结构重要度离散水平, 综合表达了输水系统网络结构抗毁性。

上述研究多集中在特定静态状态下长距离输水系统的可靠性表达, 为保障输水系统运行安全提供理论借鉴。然而, 蓄意攻击长距离输水系统时, 具有连续打击和级联失效特性, 导致网络结构抗毁能力呈现动态变化特征。鉴于此, 基于输水系统构成, 考虑蓄意攻击的特点, 选择攻击方式, 制定节点攻击选择准则, 建立结构抗毁性仿真模型, 通过仿真计算, 揭示结构抗毁性动态演化规律, 以期为长距离输水系统遭受连续蓄意攻击下应急资源分配提供理论指导。

1 攻击策略分析

1.1 攻击类型选择

分布在广阔地域上的长距离输水管线, 依附的地质地形条件差异显著, 一旦某些关键输水建筑物遭受攻击, 发生故障而功能丧失, 将大面积

* 收稿日期: 2017-04-09 修回日期: 2017-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51379110); 湖北省水电工程施工与管理重点实验室开放基金(2016KSD05)

第一作者简介: 郑霞忠(1963-), 男, 湖北鄂州人, 博士生导师, 教授, 主要从事安全管理方面的研究. E-mail: zhengxz@126.com

通讯作者: 陈述(1986-), 男, 湖北英山人, 博士, 副教授, 主要从事安全管理方面教学研究工作. E-mail: chenshu@ctgu.edu.cn

影响城市居民生活 and 经济发展^[10]。加之,长距离输水系统管线布置复杂,若采取深度打击,输水系统功能极难恢复,具有极大的攻击效果^[11]。长距离输水工程功能重要性和网络系统易损性之间的矛盾,使得在战争或恐怖活动爆发下长距离输水系统遭受攻击的可能性增加。对于单次攻击,由于整个输水网络组成只有边(输水管道或渠道等)和点(闸门和泵站等),攻击的对象只能是其中之一,但两者攻击效率却差异明显。

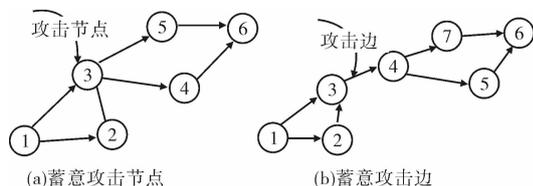


图1 节点攻击和边攻击比较图

图1a和图1b为两个输水网络简图,假设节点和边具有同等的防御能力。如攻击图1a中的节点3,沿着水流方向,节点3以后输水设施由于无水流达到而全部失效,但攻击图1a中的任何一条边都不能达到此效果;同理,若攻击图1b中节点3和节点4之间的边,输水设施4、5、6、7均失效,但攻击输水节点3或输水节点4均能达到此效果。由于每条管道只能连接两个输水建筑物,但每个输水建筑物可连接多条管道,攻击输水节点比攻击输水管道更具有破坏力,因此,攻击节点是蓄意打击采取的主要类型。

1.2 攻击路径确定

对长距离输水网络进行攻击,每次选择的节点需使得对整个输水网络破坏达到最大^[12]。由于攻击节点极少能具有严格同时性,存在攻击时间差,每攻击一个节点,整个网络结构便会发生巨大变化,后续攻击目标节点便会发生转移。如图2所示。

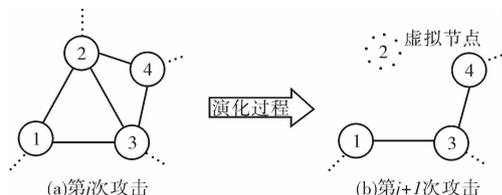


图2 输水网络结构演化图

图2a所示是处于第j次攻击时输水网络图,此时网络待攻击节点是2,第j+1次攻击节点是4,但是当节点2被毁坏后,演化为图2b所示情景,节点4却不一定是首先被攻击节点,此时节点3对网络的破坏程度可能超过节点4,攻击路径发生变化。因此,针对初始网络,选取序贯攻击基点,每次攻击完成后对当前网络重新进行评估,选取破坏最大的节点作为攻击目标,以此类推,直至整个输水网络瘫痪。换言之,节点攻击路径是以节点破坏程度

最大为目标的序贯攻击过程确定的。

2 输水节点破坏量

为量化节点破坏对当前网络整体性能的破坏程度,引入破坏量概念,输水节点的破坏量可转化为节点破坏对网络中其他节点功能的影响大小,可从该节点对相邻节点和对非相邻节点的影响两个方面进行度量。

1.1 输水节点聚类能力

为表征节点毁坏对相邻节点的破坏程度,引入输水节点聚类能力概念,描述该输水节点的相邻节点间的联系紧密程度,反映以该输水节点为中心的小星形输水网络中节点聚集情况^[13]。节点*i*的聚类系数*C(i)*定义为与其相邻的*k(i)*个节点之间实际存在边数*E(i)*与总可能边数*C_{k(i)}²*比值,即:

$$C(i) = \frac{E(i)}{C_{k(i)}^2} \quad (1)$$

对于某一特定节点,其相邻的节点已确定,如图3a所示,此时节点1、3、4、5均不连接,节点2的聚类系数等于0,如需保证节点3、4、5有水流到达,必须保证节点2完好,此时节点2的破坏量处于最大;在图3b中,1、3、4、5均相连,此时节点2的聚类系数等于1,节点2是否存在不影响节点3、4、5的功能发挥,此时节点2的破坏量达到最小。因此,*C(i)*越大,表明破坏节点的相邻节点间联系的越紧密,但节点的破坏量越小。

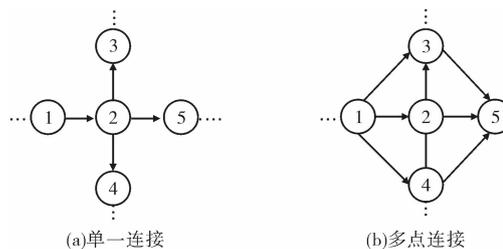


图3 节点聚类对比图

2.2 输水节点连通能力

为衡量某一特定节点对非相邻节点的影响,引入输水节点介数概念,表征节点连通能力,以此度量节点毁坏对其他非相邻节点的破坏力度。节点的介数是指在网络的所有节点对之间通过该节点的最短路径条数占所有最短路径条数的比例,综合考虑了相邻节点和非相邻节点的情况^[14]。为度量某一节点毁坏对非相邻节点的影响,本文剔除相邻部分节点,改进节点介数表达。

假设节点*s*、*t*是网络中的任意两个节点,节点*i*是区别于*s*、*t*之外的一个节点,节点*i*有*p*个上级节点和*q*个下级节点(以水流方向为准),节点*i*的上级节点和下级节点的最短路径至少有一条通过节点*i*(若上级节点、*i*、下级节点构成三角形,此时节

点 i 不属于中间节点, 该定义不包括此种情况), 则相邻节点共有 pq 条最短路径, 节点 i 介数:

$$S(i) = \sum_{s \neq t \neq i} S_{st}(i); \quad (2)$$

$$S_{st}(i) = \frac{\delta_{st}(i) - pq}{\delta_{st} - pq}. \quad (3)$$

式中: $\delta_{st}(i)$ 表示 s 、 t 之间的通过节点 i 的所有最短路径数, δ_{st} 表示 s 、 t 之间的所有最短路径数。

分析式(3)可知, 输水节点 s 、 t 通过输水节点 i 的最短路径越多, 则其节点 i 的介数越大, 节点 i 的连通能力就越强, 如果将输水节点 i 破坏, 节点 s 、 t 之间所有通过节点 i 的最短路径全部失效, 水流到达的可能性减小, 对整个输水网络的破坏量增大。

2.3 节点破坏量度量

输水节点在遭受蓄意攻击时对输水网络产生的破坏量主要有两部分组成, 对相邻节点的破坏和对非相邻节点的破坏, 任何一个节点, 其破坏量是这两部分的综合表达:

$$R(i) = a_1(1 - C(i)) + a_2S(i). \quad (4)$$

式中: a_1 、 a_2 是破坏分配系数, 取值在 $0 \sim 1$ 之间, 若节点连接度低, 毁坏节点对非相邻节点的影响要高于相邻节点, $a_1 < a_2$, 反之, $a_1 > a_2$ 。 $R(i)$ 越大, 表明节点的破坏量越大, 将作为序贯攻击的目标节点。

3 输水网络结构抗毁性

输水网络遭受连续序贯攻击条件下, 水流在输水网络中流动效率会降低, 输水功能难以保障。为度量网络输水效率能维持在一个可接受水平的能力, 用水流在输水网络中流通的难易程度来表征输水网络结构抗毁性:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{s \neq t} \frac{1}{d_{st}}. \quad (5)$$

式中: d_{st} 是指节点 s 、 t 最短路径距离, N 是初始网络的节点数目, 每次攻击完成后, 输水节点毁坏, 可用虚拟输水节点代替(如图 2b 所示), 此时的虚拟节点不具备任何功能, 但其存在保证了输水网络的框架, 便于比较输水效率变化。在输水节点数目一定的情况下, E 越大表明任意两点间最短路径较小, 整个网络的输水效率高, 抗毁能力大。

在整个序贯攻击过程中, 不同节点占据不同攻击位置, 导致攻击先后顺序差异明显, 进而节点毁坏对整个网络抗毁性的影响通常也不相同。定义相邻两次攻击网络结构抗毁性变动梯度作为攻击节点的关键程度。即:

$$\Delta E(j) = |E(j+1) - E(j)|. \quad (6)$$

ΔE 值越大, 表明攻击该节点将会引起输水网络结构抗毁性的剧烈变化, 属于整个序贯攻击目标中关键节点。

4 实例分析

4.1 工程概况

现有一长距离输水系统, 为南水北调中线一部分(图 4), 整个输水网络有 67 个输水节点, 155 条输水管道或渠道, 整体呈现“六横十纵”排列模式, 运用 Epanet 软件进行水力模拟, 选取某水流方向作为节点管道走向。由于长距离输水系统与输水设施所在地水源联合调度, 因此为降低仿真设计难度, 假设只有 4 个水源, 节点号为 1、4、18、22, 取水点有 3 个, 节点号为 63、66、67。

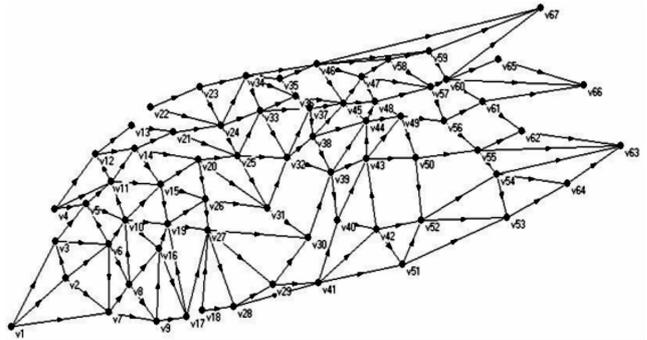


图 4 输水网络图

4.2 初始输水网络节点破坏量

分析初始输水网络, 构造邻接矩阵, 根据式(1)求解输水节点的聚类系数, 由式(2)~式(3)可求得输水节点改进介数。由于该仿真实例属于稀疏网络, 节点无高连接度特征, 攻击节点对非相邻节点的影响要高于相邻节点, 因此本文取 $a_1 = 0.3$, $a_2 = 0.7$, 据式(4)得到可得到初始网络节点破坏量如表 1 所示。

分析表 1, 对比输水网络图, 由此发现初始网络破坏量最低的节点为 18 和 22, 处于整个输水网络的边缘位置, 而破坏量最高节点为 39, 处于整个输水网络的中间位置, 是首次攻击的目标节点, 这与实际情况相吻合。

4.3 序贯攻击路径

由表 1 可知, 节点 39 的破坏量最大, 第一次蓄意攻击选取节点 39, 当节点 39 毁坏后, 重构网络并对其评估, 以此类推, 直到输水网络全部瘫痪, 具体序贯攻击路径如表 2 所示。

序贯攻击路径整体呈现出由中间到边缘的趋势, 处于输水网络中间位置的节点如果遭受攻击对整个网络的破坏程度高。在序贯攻击条件下, 将整个输水网络摧毁至少需要 29 次攻击, 其中, 第 17 次攻击后, 输水节点 28~29 无需攻击, 成为孤立节点, 自动失效。相同情况还有第 21 次攻击节点 25 后, 节点 21 失效; 第 26 次攻击节点 48 后, 节点 44、49 同时失效; 第 28 次攻击节点 6 后, 节点 5 自动失效; 第 19 次攻击节点 3 后, 节点 1、2 失效, 至此, 网络完全瘫痪。

表1 初始输水网络节点破坏量

节点	聚类系数	介数	破坏量	节点	聚类系数	介数	破坏量	节点	聚类系数	介数	破坏量
1	0.3333	0	0.2000	24	0.1667	0.0445	0.2811	46	0.1190	0.0422	0.2938
2	0.3333	0.0006	0.2004	25	0.1667	0.0348	0.2743	47	0.2500	0.0250	0.2425
3	0.2500	0.0064	0.2294	26	0.2000	0.0209	0.2546	48	0.2000	0.0347	0.2643
4	0.3333	0.0000	0.2000	27	0.1190	0.0952	0.3309	49	0.1500	0.0302	0.2761
5	0.2000	0.0188	0.2531	28	0.2500	0.0218	0.2402	50	0.0833	0.0341	0.2989
6	0.2000	0.0142	0.2499	29	0.2500	0.0197	0.2388	51	0.2500	0.0209	0.2396
7	0.2000	0.0121	0.2484	30	0.0833	0.0635	0.3195	52	0.1500	0.0188	0.2682
8	0.2500	0.0065	0.2296	31	0.1500	0.0276	0.2743	53	0.2500	0.0094	0.2316
9	0.2500	0.0198	0.2388	32	0.1667	0.0581	0.2907	54	0.2000	0.0099	0.2469
10	0.1667	0.0466	0.2826	33	0.2000	0.0166	0.2516	55	0.1000	0.0255	0.2878
11	0.2000	0.0342	0.2639	34	0.1667	0.0444	0.2811	56	0.0000	0.0248	0.3174
12	0.1667	0.0064	0.2545	35	0.3333	0.0000	0.2000	57	0.1000	0.0372	0.2961
13	0.0000	0.0044	0.3031	36	0.2000	0.0073	0.2451	58	0.2500	0.0117	0.2332
14	0.1500	0.0393	0.2825	37	0.2500	0.0136	0.2345	59	0.2500	0.0179	0.2375
15	0.2000	0.0256	0.2580	38	0.2500	0.0166	0.2366	60	0.1000	0.0328	0.2929
16	0.2500	0.0060	0.2292	39	0.1333	0.1049	0.3335	61	0.0833	0.0089	0.2813
17	0.2500	0.0314	0.2470	40	0.2500	0.0183	0.2378	62	0.1667	0.0011	0.2508
18	0.5000	0.0000	0.1500	41	0.1500	0.0435	0.2854	63	0.2500	0.0000	0.2250
19	0.2000	0.0464	0.2725	42	0.2000	0.0221	0.2555	64	0.3333	0.0017	0.2012
20	0.2000	0.0256	0.2579	43	0.1667	0.0565	0.2896	65	0.5000	0.0000	0.1500
21	0.0833	0.0454	0.3068	44	0.2000	0.0532	0.2773	66	0.3333	0.0000	0.2000
22	0.5000	0.0000	0.1500	45	0.1429	0.0368	0.2829	67	0.3333	0.0000	0.2000
23	0.3333	0.0022	0.2015								

表2 序贯攻击路径

攻击序号	攻击节点								
1	39	7	30	13	45	19	4	25	31 + 42
2	56	8	18	14	38	20	19	26	48
3	27	9	61	15	14	21	25	27	7
4	50	10	65	16	10	22	24	28	6
5	60	11	46	17	41	23	23	29	3
6	13	12	59	18	11	24	43		

4.4 抗毁性能演化

每次攻击完成后,输水网络结构发生变化,根据式(4)可得到每次形成的输水网络结构抗毁度(图5)。分析图5可知,第0次攻击表示网络未遭受攻击,处于初始状态,此时网络结构抗毁度为0.2686。第4次攻击完成后网络结构抗毁性下降较大,而第5~13次攻击过程中,网络结构抗毁性下降的比较平缓。当进行到第29次攻击时,整个网络结构抗毁性为0.0345,由于部分节点形成相邻闭环状结构,实际上,所有用水点和取水点被切断,不能实现输水功能,输水网络瘫痪。

4.5 节点关键性分析

输水节点的关键性表明了整个攻击过程中节点的损坏对整个输水网络结构抗毁性的影响程度,在求得网络结构抗毁性的基础上,根据式(6)可求

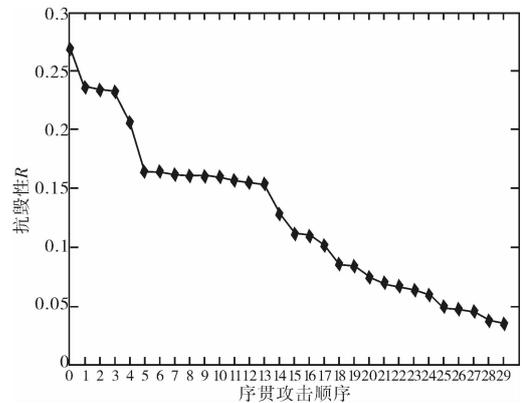


图5 结构抗毁性能演化图

得各攻击目标节点关键程度,如图6a所示,图6b是序贯攻击中目标节点的破坏量。

输水节点的关键性表明了整个攻击过程中,

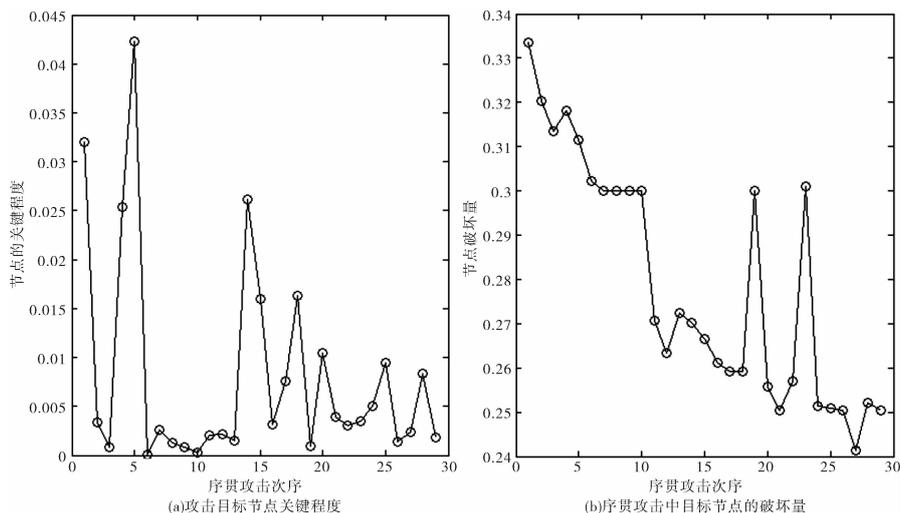


图6 节点关键性和破坏量

节点的损坏对整个输水网络结构抗毁性的影响程度, 在求得网络结构抗毁性的基础上, 根据式(6)可求得各节点的关键程度, 如图6 a所示, 第5次攻击的节点60最关键, 关键性高的节点主要有39、50、38, 这些节点均处于整个输水网络的中间位置, 很多节点对之间的最短路径要通过这些节点, 其损坏对网络结构抗毁性影响大; 而关键程度低的节点为65、4等, 均处于输水网络边缘, 关键程度相对较低。

图6 b为输水节点破坏量分布图, 其中破坏量最大的是第一次攻击的节点39, 继续攻击节点的破坏量整体呈现下降趋势, 破坏量最小的是第27次攻击的节点7, 主要原因是节点7遭受攻击较晚, 此时网络非常稀疏, 节点7的破坏作用降低。

对比分析两图可以发现, 节点的关键性和节点的破坏量不具有同步性, 最关键的节点不是破坏量最大的节点, 主要原因是节点的关键程度是针对整个序贯攻击过程, 而节点破坏量是针对单次攻击下网络结构。因此, 在资源有限的条件下, 应以关键节点为主要防护对象, 对长距离输水网络进行防护要重点突出, 动态管理。

5 结语

(1) 本文以输水建筑物为节点, 比较节点攻击和边攻击的差异性, 确定节点攻击策略, 厘定节点破坏量, 定义输水网络抗毁度和输水节点关键度, 仿真序贯攻击下输水网络结构抗毁性演化规律。

(2) 序贯攻击路径呈现从网络中间到边缘的趋势, 序贯攻击下, 输水网络结构抗毁性能呈下降趋势; 破坏量最大的节点和最关键的节点不具有同步性, 节点破坏量只针对当前网络, 关键节点相对于整个攻击过程而言。

(3) 便于讨论, 本文仅仅考虑了蓄意攻击条件下, 并未考虑破坏的随机性, 如何度量其对输水系统的影响将是笔者进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 程敏, 曹义敏. 基于模糊 FMEA 的长距离输水管线顶管施工风险分析[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 76-82.
- [2] 中国工程建设标准化协会. CECS193: 2005 城镇供水长距离输水管(渠)道工程技术规划[S]. 北京: 中国计划出版社, 2005.
- [3] 陈述, 汪飞, 郑霞忠, 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.
- [4] 余建星, 王宏伟, 王亮, 等. 冰力作用下穿越河流输水管线的可靠性分析[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(3): 110-113.
- [5] 冯平, 王仲珏, 刘增明. 长距离输水工程综合水毁风险的估算方法及其应用[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1388-1392.
- [6] Cassaro M A, Cassaro M J, Ragade R K, et al. Risk based decision support model for water delivery systems subject to natural hazards[C]// Lifeline Earthquake Engineering in the Central and Eastern US, New York, NY, USA, 1992.
- [7] Jack U, de Souza P, Kalebaila N. Development of emergency response plans for community water systems[J]. Water SA, 2015, 41(2): 232-237.
- [8] 胡蕾, 石长征, 伍鹤皋. 考虑行波效应的大跨度倒虹吸明钢管地震反应分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(1): 197-202.
- [9] 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.
- [10] 练继建, 王旭, 刘婵玉, 等. 长距离明渠输水工程突发水污染事件的应急调控[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2013, 46(1): 44-50.
- [11] 冯平, 王仲珏, 田为民. 基于二维 Gumbel 分布的长距离输水系统水文风险评估[J]. 灾害学, 2008, 23(1): 23-26.
- [12] 种鹏云, 帅斌. 连环恐怖袭击下危险品运输网络级联失效建模[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(4): 1059-1065.
- [13] 刘志谦, 宋瑞. 基于复杂网络理论的广州轨道交通网络可靠性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(5): 194-200.
- [14] 何宇, 赵洪利, 姚曜, 等. 介数中心性和平均最短路径长度整合近似算法[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2011, 8(3): 44-53.

(下转第10页)