

蓄意攻击下供水工程风险评估及防护研究

黄元成¹ 张树财²

1. 安置住房保障中心; 2. 31650 部队

摘要: 针对蓄意攻击下城市供水工程防护的问题, 提出一种供水工程关键单元风险评估方法。确定关键单元为水库、输水管渠、供水厂和供水管网, 并利用层次分析与模糊评价相结合的方法, 从威胁、易损性、打击后果和恢复力四个方面对各关键单元蓄意攻击下的风险进行评估, 并给出了各关键单元相应的防护建议。结果表明, 水库和供水厂在蓄意攻击下的风险明显高于输水管渠和供水管网, 在应对蓄意攻击风险时, 应对水库和供水厂给予一级防护措施, 输水管渠和供水管网给予二级防护措施。

关键词: 供水工程; 风险评估; 层次分析; 安全防护
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.19.067

近年来蓄意攻击已经成为战争的主要作战方法^[1]。自1849年奥意战争中首次采用气球对目标蓄意打击以来, 战争形势由地面转向地上。由于其突然性大、破坏力强、范围广等特点, 逐渐被各个国家予以重视^[2]。第二次世界大战中美英联军出动144万余战机摧毁敌方一半以上的工业能力; 1991年的海湾战争持续42天, 其中进行了38天的空袭^[3]。随着现代高科技制导武器的不断发展, 在未来战争中蓄意打击对城市关键基础设施的威胁也将越来越大。

供水工程作为城市关键基础设施中重要的一个部分, 战争中若遭到蓄意攻击必将产生连锁反应, 造成多种严重后果^[4]。首先, 城市供水工程若遭到打击, 不仅会严重破坏城市居民生活正常用水及工业供水, 而且还会引发级联效应, 引发其他基础设施网络的破坏, 同时若水库和水厂中存储的氯气被打击后遭到泄漏还会引发严重的次生灾害效果。因此, 对城市供水工程关键单元进行风险评估, 提高供水工程的防护能力, 是当前城市安全部门亟待解决的问题。

目前还没有关于蓄意攻击下供水工程防护的相关研究。大多研究都在自然灾害下的风险评估上: 汤洪洁^[5]对长距离调水工程进行风险评估, 通过考虑复杂系统问题, 从风险发生可能性及严重性对供水工程进行了风险评价, 但是她主要考虑的是自然环境下的风险, 未能考虑蓄意攻击; Abbas Roozbahani等^[6]人对供水工程中各节点潜在威胁进行分析, 提出一种城市供水工程综合风险评估模型。以上研究均对本文针对供水工程风险评估提供了有效的理论支撑, 但是未能针对蓄意攻击系统的对供水工程各环节进行风险评估。

本文将城市供水工程从源头到用户进行重要节点筛选, 建立考虑包括价值、脆弱性、危害性以及防护能力四个方面要素的评估模型, 以保证风险评估体系的完整性。由于供水工程多数参数在整体评估只有定性的表达, 因此, 本文选择层次分析法及综合模糊评判相结合的综合风险评估方法, 将定性定量相结合, 对供水工

程各关键单元进行风险评估。

一、城市供水工程关键单元分析

城市供水工程系统类型多, 结构复杂, 现代空袭实行点目标的精确打击方式, 破坏关键单元, 造成系统整体链条的瘫痪, 势必对系统单元的关键部位、节点的防护提出了更高的要求。另一方面, 对供水工程的防护, 若对每个序列逐个进行防护, 保证系统不受一点破坏, 是很难实现, 此外, 会造成防护任务量多, 防护无重点, 耗费防护资源, 因此, 应考虑现有的资源与能力外, 对系统中的重要设施、关键部位或枢纽节点加强防护。通过系统安全的原理分析, 找到各个单元目标运行系统中的主要危险节点, 确定各类工程单元运行过程中的高风险遭袭点, 即关键区域节点。

城市供水工程流程通常为: 由水源取水, 进长线输水管区送入水厂进行水质处理, 后经过水厂加压输入到城市配水管网, 距离较远的地方则由二次加压水泵进行加压输送至用户, 其流程如图1所示。

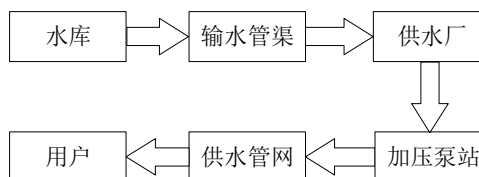


图1 供水工程流程

供水工程源头包括本地水源和外来水源^[7]。本地水源主要包括当地水库河流等, 其间的关键单元为大坝。若大坝遭到蓄意攻击, 不仅仅会造成供水无法正常运行以外, 水库水发生泄漏还会造成周围居民区、农田、道路及企业等被淹, 造成巨大经济损失和人员伤亡^[8]。外来水源则是从外地湖泊河流通过调水工程输送过来。同时现有水库抢险抢修力量多为汛情及常见突发事件, 并无应对防空袭的力量。且水库目标大、分布广, 难以全面实现防护, 鉴于其重要性也必将成为战争蓄意攻击的重要目标。

与水源不同, 输水渠道负责将水源的水源源不断输入到城市管网中, 连通水库、水厂及重要生产单元的取水, 属于整个城市供水工程的大动脉。同时, 输水渠道具有分布范围广、支线多、距离长等特点, 其关键的阀门、调压泵站和分水口等节点一旦遭受打击, 将影响到水源的正常输送。因此, 输水渠道也是蓄意攻击的重要目标。

市内供水网络包括供水厂、加压站以及供水管网, 水厂作为城市供水网络的供水源头, 不仅负责对水源输送来的水进行过滤、消毒处理, 同时负责将处理好的水进行加压输送至供水管网。供水厂若遭到打击不仅严重影响水的处理, 由于其中存有用于消毒的氯气罐, 这些氯气若扩散还会引发严重的毒气扩散次生灾害。供水管网中主要包括运输的管道, 分布广泛且大多埋于地

下，蓄意攻击很难对此造成全局的破坏，但位于地面的加压泵站、管网及附属设施、阀门等若遭到打击，也会严重引起局部地区缺水。

通过分析供水工程各单元结构及特征，分析各单元蓄意攻击后的打击后果，得到蓄意攻击下重要防护单元为：水库、输水管渠、供水厂和供水管网。

二、关键区域节点风险评估模型

(一) 风险评估原理

供水工程分级是指对工程面临的风险进行系统地评估。在现有的关键基础设施防护相关的研究中，“风险”通常被定义为“威胁、易损性和打击后果的函数组合”^[9]。“威胁”是指目标遭受攻击的可能性；“易损性”是指目标遭到成功打击的可能性；“打击后果”是目标遭到打击后所造成严重损失。如式(1)所示：

$$\text{风险} = \text{威胁} \times \text{易损性} \times \text{灾害后果} \quad (1)$$

这种评估方法未能考虑到目标遭到打击后恢复资源对风险的影响。通常目标专业抢修队越多，目标遭到打击后恢复时间越短，这同时也会影响到目标的风险值，恢复力越高其风险越低。因此，本文对供水工程进行风险评估包括四个方面：威胁、易损性、打击后果以及恢复力四个方面。因此，本文定义供水工程风险可表达为：

$$\text{风险} = \frac{\text{威胁} \times \text{易损性} \times \text{灾害后果}}{\text{恢复力}} \quad (2)$$

威胁性，即工程受敌关注的程度，与工程的功能价值、经济价值、社会价值、政治价值等密切相关，进一步分析则与产品种类、服务保障对象、产量大小等参数有关。其次易损性，与遭受的工程自身的物理结构、防护措施等因素有关；打击后果是工程遭到袭击后的损失大小、人员伤亡、财产损失、环境代价以及对经济系统的功能影响等后果性；恢复力主要包括事先的防护措施以及打击后的抢险抢修能力，以恢复系统功能。

(二) 风险评估框架

本文将针对供水工程中四个关键单元，从威胁、易损性、打击后果以及恢复力四个方面来对供水工程风险进行评价。通过层次分析与模糊评价相结合的方法，对供水工程总风险进行定量计算。风险评估框架如图2所示。

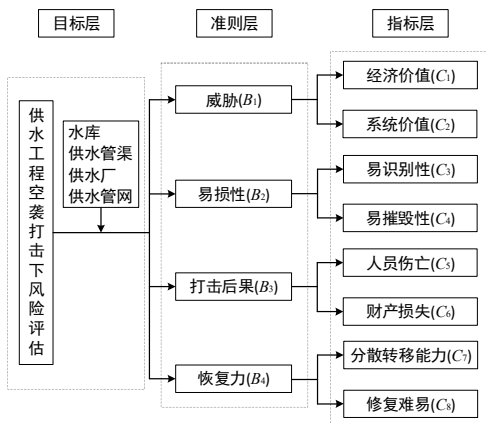


图2 风险评估框架

(三) 准则权限计算

根据当前生命线工程风险评估的研究需要，需将评判模型能够将定量分析与定性判断相结合，因此，本文选用层次分析法、综合模糊评判作为基本评估方法。层次分析法是由美国运筹学家Saaty提出的一种层次权重决策分析方法^[10]，通过建立包括目准则和方案的层次分析结构模型，构建评价系统判断矩阵，把最低层和最高层的相对重要权值排列出来，供决策者参考使用。具体方法步骤如下所示：

第一步：建立层次结构模型。通过分析供水工程蓄意攻击风险的各影响因素的层次关系，建立包含目标层、准则层和指标层评估指标体系。

第二步：构建判断矩阵。通过一致矩阵法，采用普遍使用的Satty标度表为基准，将各要素之间进行两两比较确定合适标度。

第三步：收集并统计专家打分结果，对各要素进行权重排序以及一致性检验，得到准则层各要素的权重系数。详细计算步骤如下：

首先为得到一致性认可，构造对比矩阵，通过对不同元素两两比较，以一个相对的概念，改善不同元素间比对困难的问题，以提高准确性。参与比较的元素i和j重要性比对结果用 a_{ij} 进行表示，假设有n个元素参与比较，则形成判断矩阵如下：

$$A = (a_{ij})_{n \times n} \quad (3)$$

在矩阵中， a_{ij} 的取值可参考Saaty的建议，按标度赋值，

$$\text{其中, } a_{ij} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} .$$

在构建判断矩阵时为避免出现逻辑性错误，需对矩阵进行一致性检验。定义一致性指标CI：

$$CI = \frac{\lambda_{\max}(A) - n}{n - 1} \quad (4)$$

其中， λ_{\max} 表示判断矩阵的特征值，若CI=0，表示矩阵具有完全一致性，CI值由零增大，表示矩阵的不一致性会越来越严重，为方便衡量CI的大小，引入随机一致性指标RI。此指标与矩阵的阶数有很大联系，通常情况下，矩阵阶数越高，RI值越大，越易出现一致性偏离，具体标准值如表3所示：

表1 平均随机一致性指标RI

阶数n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

对于1阶2阶判断矩阵，总是完全一致的。当阶数大于2时，为避免随机原因导致一致性的误差，引入随机一致性比率CR来检验判断矩阵是否具有满意的一致性。定义随机一致性比率CR为

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

当CI<0.1时，认为判断矩阵A具有满意的一致性，

否则不能满足一致性。当判断矩阵满足一致性检验时，计算最大特征值所对应的特征向量，如下所示：

$$\begin{cases} a'_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \\ w'_i = \sum_{j=1}^n a'_{ij} \quad i, j=1, 2, \dots, n \\ w = \frac{w'_i}{\sum_{j=1}^n w'_j} \end{cases} \quad (6)$$

所得到 $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 为所求特征量，即各层次指标间的权重。

(四) 评估指标分级

对评估风险模型中指标层各因素进行评判，通过专家赋值的方式进行模糊评定。固定任何一个指标，进行单因素评判，得到各评判指标的分级。

表2 风险评估指标分级

目标层	准则层B _i	指标层C _j	各指标描述及程度分级	赋值	
风险值 R	威胁 (B ₁)	经济价值 (C ₁)	投资建设成本非常大	8-10	
			投资建设成本很大	5-7	
		系统价值 (C ₂)	投资建设成本较大	1-4	
			对系统功能非常重要	8-10	
		易识别性 (C ₃)	对系统功能很重要	5-7	
			对系统功能较重要	1-4	
		易损性 (B ₂)	易摧毁性 (C ₄)	占地面积大，易被发现	8-10
				占地面积中，较易被发现	5-7
	打击后果 (B ₃)	人员伤亡 (C ₅)	占地面积小，不易被发现	1-4	
			自身结构弱，易被摧毁	8-10	
		财产损失 (C ₆)	自身结构中，较易被摧毁	5-7	
			自身结构强，不易被摧毁	1-4	
		分散转移能力 (C ₇)	引发严重人员伤亡	8-10	
			引发较严重人员伤亡	5-7	
		恢复力 (B ₄)	修复难易 (C ₈)	引发较轻人员伤亡	1-4
				引发严重财产损失	8-10
		引发较严重财产损失	5-7		
		引发较轻财产损失	1-4		
		不能分散与转移	8-10		
		难以分散与转移	5-7		
		可分散与转移	1-4		
		不能修复	8-10		
		难以修复	5-7		
		容易修复	1-4		

(五) 风险指标分级

对各系统的评价是根据各被评价子系统的实际情况给予定量打分，确定相应的评价值，将各个指标的赋值 (W_{ij}) 和相应的复合权重 (D_{ij}) 相乘即可求出最终的重要经济目标风险评估结果R。供水工程关键单元风险评估模型的表达式为：

$$\begin{aligned} R &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (D_{ij} \times W_{ij}) \\ D_{ij} &= B_i \times C_j \end{aligned} \quad (7)$$

式中，p为准则层的数量，q为指标层的数量，R为风险评估值，D_{ij}为各指标参数的复合权重系数，B_i为第n个准则层的权重系数，C_j为第m个准则层的权重系数，W_{ij}为第n个准则层下第j个指标的赋值。

计算得出的供水工程总风险评价结果 (R) 可用于评判目标所需的防护等级，总风险值越高，所需防护等级越高。参考重要经济目标防护等级划分，将目标所需防护等级划分三个标准，如表5所示。

表3 防护等级划分

防护等级	风险取值	说明
I	8 ≤ R ≤ 10	风险高，易受打击，后果非常严重，所需防护等级高
II	5 ≤ R < 8	风险中，较易受打击，后果较为严重，所需防护等级中
III	1 ≤ R < 5	风险低，不易受打击，后果不严重，所需防护等级低

三、结果分析

根据专家意见，将各个指标的相对重要程度表现出来，准则层评价因素相对于目标层的判断矩阵如表6所示：

表4 判断矩阵

R	威胁	打击后果	易损性	恢复力
威胁 (B ₁)	1	3	5	7
易损性 (B ₂)	1/3	1	3	5
打击后果 (B ₃)	1/5	1/3	1	3
恢复力 (B ₄)	1/7	1/5	1/3	1

由此计算比较矩阵得出权重系数为0.5650, 0.2622, 0.1175, 0.0553。比较矩阵的最大特征值 λ_{max}=4.117, 根据公式 (2) 解的一致性指标CI=0.039。由表2查得平均随机一致性指标RI=0.9, 根据式 (3) 求解出CR=0.0433<0.1。因此，该判断矩阵具有满意的一致性。因此准则层各因素权重系数分别为C₁=0.5650, C₂=0.2622, C₃=0.1175, C₄=0.0553。各指标排序为威胁 同理可计算得到各准则层下指标j的权重系数B_j，进而得到指标j的复合权重系数D_{ij}。如表7所示：

表5 风险评估指标权重

目标层	准则层	权重 C_i	指标层	权重 B_j	复合权重 D_{ij}
风险值 R	威胁 (B_1)	0.565	经济价值	0.512	0.289
			系统价值	0.488	0.276
	易损性 (B_2)	0.262	易识别性	0.533	0.140
			易摧毁性	0.467	0.122
	打击后果 (B_3)	0.118	人员伤亡	0.625	0.073
			财产伤亡	0.375	0.044
	恢复力 (B_4)	0.055	分散转移能力	0.432	0.024
			修复难易	0.568	0.031

根据第二节对城市供水工程关键单元的分析，其中水库、输水管渠、供水厂和供水管网是供水工程的关键单元。通过专家对各关键单元的模糊打分，根据公式(7)，能够计算出各关键单元的风险值，如图3所示。

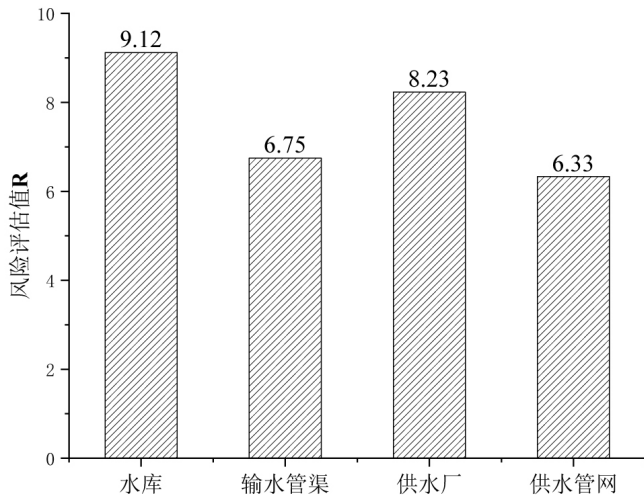


图3 风险评估值

四、安全防护及建议

本文通过对城市供水工程进行分析，选择水库、输水管渠、供水厂和供水管网为关键单元，利用层次分析和模糊评价方法，针对关键单元的威胁、易损性、打击后果和恢复力四个方面进行了风险评估。根据计算结果，得出供水工程各关键单元的风险评估值R，四种单元风险评估值分别为 1级 1级 2级 2级。根据各关键单元特点对供水工程防护提出以下建议：

(1) 水库面积广，目标明显，水库大坝易损性强，且防护难度大。因此对其防护可以采取隐真示假、电子干扰等手段。通过采用以土丘、植被、制式伪装器材、大坝涂涂抹抹红外涂料等方式进行伪装，也可以用迷彩帆布搭建假大坝或设置充气大坝和橡胶大坝的方式误导敌人。还可以通过设置电子干扰器材和设备，对敌人的导弹进行干扰。

(2) 供水厂作为城市供水网络的源头，目标明显，易损性强。因此对其防护可以优先采取地下化配置，无法地下配置的，采用伪装防护、设障防护的方式，以达到降低敌方打击的概率。同时各水厂还可以设置专门的抢修抢建专业队工程、伪装设障专业队工程，以加速工程被打击后的恢复速度。

(3) 输水管渠与供水管网分布范围广、难以防护，位于第二防护等级。输水管渠主要负责长距离的输水任务，供水管网覆盖率大，且大多埋于地下，难以通过增加部分局部地区的防护能力来有效提高整体防护水平。因此，对于这两类储备预制管道、提高维修队能力等方法，加快对损坏部分的维修，降低被打击后的影响。

(4) 整个供水功能的实现需要有电力的支持。电力系统的失效必然会引发供水工程的级联反应，因此，应为各关键单元配备应急电源，保证在供电失效情况下供水系统的正常运作。

参考文献

[1] 贾利, 张顺伟, 王亮等. 美军空袭作战中对敏感目标的打击能力评估[J]. 电子信息对抗技术, 2009, 24(1): 55-59.

[2] 马新星, 辛庆伟, 侯学隆. 现代空袭体系的特点及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2017(5): 67-71.

[3] 钱七虎, 陈志龙, 郭东军. 重要经济目标防护措施及对策[C]. 钱七虎院士论文选集, 2007.

[4] 双晴. 基于级联失效的城市供水管网系统可靠性研究[D]. 大连理工大学, 2014.

[5] 汤洪洁. 长距离调水工程风险评估工作思考[J]. 水利规划与设计, 2020(5): 86-91.

[6] Abbas Roozbahani, Banafsheh Zahraie, Massoud Tabesh. Integrated risk assessment of urban water supply systems from source to tap[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013, 27(4).

[7] 李传科, 周翠英, 陈宗富. 驮英水库在区域水资源配置中的作用分析[J]. 广西水利水电, 2014(5): 93-96.

[8] 陈君. 浅析水利水电工程中水库库区的防护[J]. 科技风, 2020(1): 160.

[9] Willis H H. Guiding resource allocations based on terrorism risk[J]. Risk Analysis, 2007, 27(3): 597-606.

[10] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation[M]. NY, USA: McGraw-Hill, 1980.

作者简介: 黄元成(1997—), 男, 四川乐山人, 本科, 助理工程师, 主要从事工程技术与管理工作。